AGRICULTURA DE PRECISIÓN:
Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable

Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur

Argentina
Bolivia
Brasil
Chile
Paraguay
Uruguay

IICA
Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura

PROCISUR

AGRICULTURA DE PRECISIÓN:

Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable

EDITORES:

Rodolfo Bongiovanni, Ph.D.
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)
Estación Experimental Agropecuaria Manfredi, Argentina

Evandro Chartuni Mantovani, Ph.D.
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria (EMBRAPA)
Brasilia, Brasil

Stanley Best, Ph.D.
Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA)
Centro Regional de Investigación Quilamapu, Chile

Álvaro Roel, Ph.D.
Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA)
Estación Experimental Treinta y Tres, Uruguay

Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur

Argentina
Bolivia
Brasil
Chile
Paraguay
Uruguay

IICA
Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura

© Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 2006

El Instituto promueve el uso justo de este documento.
Se solicita que sea citado apropiadamente cuando corresponda

Esta publicación también está disponible en formato electrónico (PDF) en el sitio Web institucional en www.iica.int.

Coordinación editorial: PROCISUR
Corrección de estilo: PROCISUR
Diagramado: MERCOSOFT Consultores S.R.L.
Diseño de portada: MERCOSOFT Consultores S.R.L
Impresión: IMPRENTA MOSCA Y CIA.

Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable / Rodolfo Bongiovanni, Evandro C. Montovani, Stanley Best, Alvaro Roel. – Montevideo: PROCISUR/IICA 2006.
244 p.; 16,7 x 24 cm.

ISBN 92-9039-741-1

1. Producción agrícola 2. Prácticas agrícolas 3. Insumos 4. Modernización I. Bongiovanni, R. II. Montovani, E.C. III. Best, S. IV. Roel, A. V. IICA VI. PROCISUR VII. Título

AGRIS
E14

DEWEY
338.162

Montevideo, Uruguay
2006

PRESENTACIÓN

El Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur (PROCISUR), creado en 1980 con el apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), constituye un esfuerzo conjunto de los Institutos Nacionales de Investigación Agropecuaria –INIAs– de Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Paraguay y Uruguay, y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

A lo largo de su historia, ha sido preocupación de PROCISUR contribuir a la instalación de los nuevos descubrimientos y avances tecnológicos en la región. En ese contexto, PROCISUR desde hace 6 años, cuando recién se comenzaba a hablar de este tema en la región, ha venido apoyando las actividades de cooperación tendientes a difundir y desarrollar, para nuestras condiciones, las tecnologías de la Agricultura de Precisión. Basado en este espíritu de cooperación que caracteriza a PROCISUR, se fueron realizando Seminarios, Talleres, Cursos y una serie de actividades de intercambio de experiencias entre técnicos y productores líderes de los 6 países del Cono Sur. Al mismo tiempo, se contribuyó con expertos de países más avanzados que nos permitió disponer de distintas visiones y experiencias en una tecnología de incipiente desarrollo para la región.

Para culminar esta primera etapa de intercambio y consolidar al grupo de profesionales que han sido pioneros en el desarrollo de la Agricultura de Precisión, PROCISUR ha impulsado la publicación de este libro, que recoge tanto los aspectos conceptuales de esta nueva tecnología como también los avances de aplicación en los países del Cono Sur. Creemos que este libro será de utilidad para nuestros países en su búsqueda de nuevas tecnologías que ayuden a nuestra agricultura a ser más competitiva y moderna, al mismo tiempo que sirva de estímulo a las nuevas generaciones de profesionales que tendrán la responsabilidad de continuar con el desarrollo de estas y otras nuevas tecnologías, que cada vez emergen con mayor frecuencia y velocidad.

Estamos conscientes que en poco tiempo habrá nuevos descubrimientos, que tal vez dejen en el olvido mucho de lo que aquí se plantea, y en ese sentido esta publicación también pretende ir dejando un registro de los asombrosos avances que se están logrando con la incorporación de innovaciones tecnológicas basadas en la utilización multidisciplinaria de ciencias que tradicionalmente no eran consideradas en la agricultura. Pero al mismo tiempo, la mayor obsolescencia que caracteriza este tipo de innovaciones, constituye un desafío para nuestras instituciones de investigación y profesionales, para seguir avanzando y en forma permanente actualizar nuestras propuestas tecnológicas. En ese sentido, PROCISUR estará siempre disponible para cooperar en la preparación y publicación de nuevas ediciones de este libro, con el objeto de seguir creciendo y mejorando esta línea de trabajo, que ciertamente se está transformando en una enorme herramienta para la modernización y eficiencia de nuestra agricultura.

Emilio Ruz Jerez
Secretario Ejecutivo
PROCISUR

INDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN A LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN 13
E. Mantovani; F. de A. de Carvalho Pinto y D. Marçal de Queiroz

INTRODUCCIÓN 15
¿QUÉ ES LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN? 15
ANTECEDENTES Y EVOLUCIÓN 18
ADOPCIÓN DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN 19
AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN CULTIVOS TRADICIONALES 19
BENEFICIOS POTENCIALES 20
REFERENCIAS 22

CAPÍTULO 2. SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO 23

2.1. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS) 25
M. Claret; S. Best y L. León

INTRODUCCIÓN 25
¿CÓMO FUNCIONA EL SISTEMA GPS? 25
1. Triangulación de los satélites 26
2. Medición de distancia a los satélites 27
3. Control del tiempo 28
4. Determinación de la posición de los satélites 29
5. Corrección de errores 29
CORRECCIÓN DIFERENCIAL DGPS 31
SISTEMA DE POSICIONAMIENTO ALTERNATIVO 33
Incorporación del viñedo al sistema de agricultura precisión 33
APLICACIONES DEL GPS 33
Equipos que dependen de un DGPS 34
SOFTWARE DE APOYO 37

2.2. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL Y SU APLICACIÓN EN AGRICULTURA 38
M. Bragachini; A. Méndez; F. Scaramuzza y F. Proietti

INTRODUCCIÓN 38
UTILIZACIÓN DEL GPS COMO BANDERILLERO SATELITAL 39
Utilidad de los banderilleros satelitales 40
DESARROLLOS LOCALES 41
CONCLUSIONES 41

CAPÍTULO 3. MONITOREO DE RENDIMIENTO Y ELABORACION DE MAPAS 43

3.1. CULTIVOS TRADICIONALES 45
M. Bragachini; A. Méndez; F. Scaramuzza y F. Proietti

MONITORES DE RENDIMIENTO 45
TARJETAS DE MEMORIA PARA ALMACENAR DATOS 46
SOFTWARE DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN 46
CALIBRACIÓN DEL MONITOR DE RENDIMIENTO 47
Monitor de rendimiento 47
Calibración de los monitores de rendimiento 49
Control de pérdidas con monitor de rendimiento por medio del flujo de granos (t/h) 51
Descripción del Monitor de Rendimiento Ag Leader Insight 51
POTENCIALIDAD DE LOS MONITORES DE RENDIMIENTO EN LA COSECHA DE ENSAYOS Y EN LOTES DE PRODUCCIÓN 52

3.2. VITIVINICULTURA Y FRUTICULTURA 55
S. Best; L. León y M. Claret

3.2.1. VITICULTURA DE PRECISIÓN: UNA NUEVA Y PODEROSA VÍA TECNOLÓGICA HACIA LA PRODUCCIÓN DE VINOS DE ALTA CALIDAD 55
Introducción 55
Fundamentos y aplicaciones 55
Proyecto manejo sitio específico: Primera experiencia en Chile 57
PROGAP - INIA Chile 58
Incorporación del viñedo al sistema de Agricultura de Precisión 59
Nuevos desafíos y beneficios 60
Conclusiones 60

3.2.2. FRUTICULTURA DE PRECISIÓN: EL FUTURO CERCANO DEL MANEJO Y PRODUCCIÓN FRUTÍCOLA DE EXPORTACIÓN 61

CAPÍTULO 4. MUESTREO DE SUELOS Y FACTORES LIMITANTES DEL RENDIMIENTO 65
A. Roel y J. Terra

INTRODUCCIÓN 67
MAPAS DE RENDIMIENTO COMO INDICADORES DE MUESTREO DE SUELOS 68
SISTEMAS DE MUESTREO DISCRETOS 69
USO DE TÉCNICAS AVANZADAS DE MUESTREOS 73
ZONAS DE MANEJO 74
Mapas de rendimiento 75
Mapa de relevamiento de suelos 76
Percepción remota 76

Mapas de propiedades de los suelos o condición de cultivo obtenidos geoestadísticamente 76
Atributos fisiográficos estables temporalmente 77
PASOS LÓGICOS EN INVESTIGACIÓN 78
PASOS LÓGICOS A NIVEL PRODUCTIVO 78
REFERENCIAS 79

CAPÍTULO 5. SENSORES REMOTOS 81
M. Alves Moreira y E. Mantovani

PRINCIPIOS BÁSICOS DE APLICACIÓN 83
Radiación solar 83
Interacción de la radiación electromagnética (REM) con la vegetación, el suelo y el agua 85
SISTEMAS SENSORES 87
Sensores fotográficos 88
Sensores no fotográficos 89
USO DE DATOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA EN LOS SISTEMAS AGRÍCOLAS 91
Datos de sensores terrestres 91
Datos de sensores aerotransportados 93
Datos de sensores orbitales 94
REFERENCIAS 96

CAPÍTULO 6. TECNOLOGÍA DE DOSIS VARIABLE 99

6.1. TECNOLOGÍA DE MANEJO DE DOSIS VARIABLE 101
M. Bragachini; A. Méndez; F. Scaramuzza; M.C. Gregoret y F. Proietti

INTRODUCCIÓN 101
DOSIS VARIABLE 102

6.2. TECNOLOGÍA DE RIEGO VARIABLE 106
S. Best

INTRODUCCIÓN 106
SISTEMA DE APLICACIÓN VARIABLE DE RIEGO PARA PIVOTES 106
Sistema de aplicación variable de riego para frutales y viñas 108
Sectorizaciones 109
Automatización de sistemas de riego 109
REFERENCIAS 110

6.3. ENCALADO CON DOSIS VARIABLE 111
S. Gambaudo y R. Bongiovanni

EL PROBLEMA DE LA ACIDIFICACIÓN DE LOS SUELOS Y SU CORRECCIÓN 111
Origen del problema 111
Ventajas de su corrección 111
Cómo darse cuenta 112
CÓMO CORREGIR LA ACIDEZ DEL SUELO 113
¿Qué es una enmienda adecuada? 113
Qué tener en cuenta 114
ENCALADO CON DOSIS VARIABLE 114
EJEMPLO DE RENTABILIDAD DEL ENCALADO CON DOSIS VARIABLE 118
Costos 119
AVANCES 121
REFERENCIAS 122

6.4. CONTROL DE MALEZAS, PLAGAS Y ENFERMEDADES CON DOSIS VARIABLE 124
R. Bongiovanni

INTRODUCCIÓN 124
DOSIS VARIABLE DE HERBICIDAS APLICADOS AL SUELO 125
DOSIS VARIABLE DE HERBICIDAS POST EMERGENTES 125
Métodos de identificación georeferenciada de malezas 126
CONCLUSIONES 127
EQUIPOS DISPONIBLES Y DESARROLLOS 127
REFERENCIAS 129

CAPÍTULO 7. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) 131
J. Orellana; S. Best y M. Claret

INTRODUCCIÓN 133
ANTECEDENTES DE LOS SIG 134
DEFINICIÓN DE LOS SIG 136
COMPONENTES DE UN SIG 137
FUNCIONES DE LOS SIG 139
FUNCIONAMIENTO DE LOS SIG 139
CONSTRUCCIÓN DE BASES DE DATOS GEOGRÁFICAS 140
DESARROLLO FUTURO 142
REFERENCIAS 143

CAPÍTULO 8. ANÁLISIS DE DATOS 145

8.1. GEOESTADÍSTICA 147
S. Best y L. León

INTRODUCCIÓN 147

REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA INFORMACIÓN (MAPAS) Y RESUMEN NUMÉRICO DE LA INFORMACIÓN (HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS) 147
REPRESENTACIÓN DE MUESTREOS CONTINUOS Y DISCONTINUOS DE LAS VARIABLES 148
AUTOCORRELACIÓN ESPACIAL 151
ÍNDICES DE AUTOCORRELACIÓN ESPACIAL 152
Índice "I" de Moran 152
Índice "C" de Geary 153
MODELAJE DE SUPERFICIE: INTERPOLACIÓN ESPACIAL 153
Técnicas de caracterización de distribución de datos e interpolación espacial 154
Variograma 155
Kriging 158
Caracterización del error en la interpolación especial 159
CONDICIONES FUNDAMENTALES PARA EL ANÁLISIS DE MAPAS 160
VISUALIZACIÓN DE LAS VARIABLES ESPACIALES 160
REFERENCIAS 161

8.2. ECONOMETRÍA ESPACIAL 162
R. Bongiovanni

INTRODUCCIÓN 162
ECONOMETRÍA ESPACIAL VERSUS GEOESTADÍSTICA 163
ANÁLISIS DE REGRESIÓN EN GENERAL 163
¿POR QUÉ USAR REGRESIÓN ESPACIAL? 164
CÓMO USAR LA REGRESIÓN ESPACIAL 164
APLICACIONES EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN 165
REFERENCIAS 166

8.3. ANÁLISIS DE CLUSTER Y CART 167
A. Roel

ANÁLISIS DE CLUSTERS (GRUPOS) 167
CART 167
REFERENCIAS 170

CAPÍTULO 9. VIABILIDAD ECONÓMICA **171**
R. Bongiovanni y J. Lowenberg-DeBoer

INTRODUCCIÓN 173
ESTIMACIÓN DE LOS BENEFICIOS DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN LA PRODUCCIÓN 174
1. Estimación de los cambios en costos 175
2. Estimación de los cambios en los ingresos 178

3. Dificultades para estimar los beneficios de la agricultura de precisión 178
4. Ejemplo de presupuesto parcial 179
5. Ejemplo del análisis económico de un ensayo de dosis variable de N en maíz por el método del balance 181
6. Ejemplo del análisis económico de un ensayo de dosis variable de N en trigo por el método de la curva de respuesta 184
EJEMPLOS DE BENEFICIOS DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN LA GESTIÓN 189
En la siembra 189
En la fertilización y aplicación 190
En la cosecha 191
En la planificación 191
CONTRATISTAS 192
PRONÓSTICO DE ADOPCIÓN DE LA AP 192
Limitantes para la adopción 192
Incentivos para la adopción 193
Potencial para consultores-asesores 193
CONCLUSIONES 194
REFERENCIAS 195
ANEXOS 197

CAPÍTULO 10. ADOPCIÓN DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN EL CONO SUR DE AMÉRICA 201

CAPÍTULO 10.1. AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN ARGENTINA 203
R. Bongiovanni y J. Lowenberg-DeBoer

INTRODUCCIÓN 203
POTENCIAL DE ADOPCIÓN EN ARGENTINA 204
Sistema de posicionamiento global (GPS) 205
Monitoreo de rendimiento y mapeo 205
Banderillero satelital 206
Muestreo intensivo de suelos 206
Percepción remota 207
Sistema de información geográfica (GIS) 209
ANÁLISIS FODA DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN ARGENTINA 210
Factores que favorecen la adopción de la agricultura de precisión en Argentina (Fortalezas) 210
Factores que desfavorecen la adopción de la agricultura de precisión en Argentina (Debilidades) 212
Oportunidades 214
Desafíos 214
PRONÓSTICO 215

REFERENCIAS 217
ENTREVISTA. 218

CAPÍTULO 10.2. AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN BOLIVIA 220
J. C. Mejía

INTRODUCCIÓN 220
ADOPCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN BOLIVIA 220
Uso de banderilleros satelitales 221
Navegadores satelitales y mapeadores 221
Sistemas de información geográfica (SIG) 221
Monitores de rendimiento 221
Percepción remota 222
Estaciones meteorológicas automáticas 222

POTENCIAL DE APLICACIÓN DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN BOLIVIA 222
AGRADECIMIENTOS 224

CAPÍTULO 10.3. AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN BRASIL 225
E. Mantovani

ESTUDIO DE CASO 225

CAPÍTULO 10.4. AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN CHILE 227
S. Best

CAPÍTULO 10.5. AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN PARAGUAY 229
P. Kawamura; A. Palacios; J. Quintana y C. Ken Hoshiba

INTRODUCCIÓN 229
Principales cultivos de Paraguay 229
DIFUSIÓN DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN 230
Herramientas disponibles en el mercado paraguayo 231
Primeras experiencias de investigación locales 231
Conclusiones del trabajo de investigación 233
Empresas de servicios de agricultura de precisión 234

CAPÍTULO 10.6. AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN URUGUAY 236
A. Roel y H. Firpo

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN A LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Evandro Chartuni Mantovani (1); **Francisco de Assis de Carvalho Pinto** (2) y **Daniel Marçal de Queiroz** (2)
(1) Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria (EMBRAPA), Brasilia, Brasil.
evandro.mantovani@embrapa.br
(2) Profesor Adjunto, UFV, Viçosa, MG, Brasil
facpinto@ufv.br y queiroz@ufv.br

INTRODUCCIÓN

La agricultura mundial viene enfrentado, a lo largo del tiempo, el desafío constante de aumentar la producción agrícola en respuesta a la creciente demanda de la población. Este aumento, a su vez, se ha producido de dos formas: con la expansión de nuevas áreas agrícolas, y dentro de cada área, con el aumento de los rendimientos.

El aumento de los rendimientos se obtuvo mediante la generación de nuevas tecnologías bajo forma de semillas mejoradas, insumos modernos y agroquímicos más eficientes. Esto, junto al manejo adecuado de nuevas máquinas agrícolas para preparar, sembrar, cultivar, cosechar y procesar los productos agrícolas, permitió avances significativos en el área de producción de alimentos.

Sin embargo, con la modernización de las prácticas agrícolas, surgen nuevos desafíos, principalmente respecto al concepto de sustentabilidad ambiental y económica del proceso de producción. En este contexto, la respuesta de la investigación, extensión e innovación de los segmentos relacionados al área agrícola para enfrentar esos nuevos desafíos, ha sido la generación de tecnología que permita desarrollar técnicas que cuantifiquen y manejen diferenciadamente la variabilidad natural del área productora.

Para ello, a partir de la década del '70, se comenzó a delinear un nuevo concepto de agricultura con los estudios sobre automatización de máquinas agrícolas. En forma complementaria, a fines de la década del '80 y comienzos del '90, con la liberación del sistema de posicionamiento global por satélite (GPS) para uso civil, fue posible desarrollar equipos inteligentes que permitieron el manejo localizado de las prácticas agrícolas, con una mayor eficiencia de aplicación de insumos, reduciendo el impacto sobre el medio ambiente y en consecuencia, disminuyendo los costos de la producción de alimentos. **A ese conjunto de procesos y sistemas aplicados se los denomina Agricultura de Precisión (AP).**

Este primer capítulo tiene como objetivo presentar los conceptos básicos sobre agricultura de precisión y algunos números relacionados con los antecedentes y la adopción de esta tecnología en el mundo.

¿QUÉ ES LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN?

Las características del suelo y del cultivo varían en el espacio (distancia y profundidad) y en el tiempo. La **agricultura de precisión** es un conjunto de técnicas orientado a optimizar el uso de los insumos agrícolas (semillas, agroquímicos y correctivos) en función de la cuantificación de la variabilidad espacial y temporal de la producción agrícola. Esta optimización se logra con la distribución de la cantidad correcta de esos insumos, dependiendo del potencial y de la necesidad de cada punto de las áreas de manejo.

La agricultura de precisión no consiste solamente en medir la variabilidad existente en el área, sino también en la adopción de prácticas administrativas que se realizan en función de esa variabilidad. De acuerdo con Robert (1999), la observación de la existencia de variabilidad en las propiedades o factores determinantes de la producción en los agroecosistemas[1] no es una novedad. Lo que es diferente, en realidad, es la posibilidad de identificar, cuantificar y mapear esa variabilidad. Más aún, es posible georeferenciar[2] y aplicar los insumos con dosis variables en puntos o áreas de coordenadas geográficas conocidas.

[1] Sistema ecológico natural transformado en área usada para la producción agrícola o crianza de ganado, de acuerdo a diferentes tipos y niveles de manejo.
[2] Localizar geográficamente, a través de referencias de latitud y longitud, el punto de recolección de datos de campo.

Los agentes involucrados en el desarrollo y adopción de las prácticas de agricultura de precisión suelen dividir este conjunto de tecnologías en tres etapas diferentes (AGCO, 2005) (**Figura 1.1**): 1) Recolección de datos; 2) Procesamiento e interpretación de la información; y 3) Aplicación de insumos.

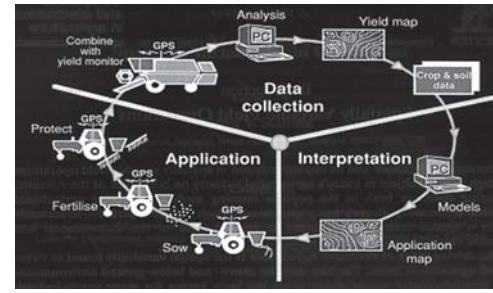


Figura 1.1: Las tres etapas de la Agricultura de Precisión (AGCO, 2005)

En base a ello, se define un ciclo de prácticas agrícolas orientado a sustituir la recomendación habitual de insumos en base a valores promedio, como ocurre en la agricultura tradicional, por una más precisa, con manejo localizado, considerando las variaciones del rendimiento en toda el área. Es una optimización del uso de los insumos porque deposita en el suelo la cantidad de semilla que cada punto soporta, la cantidad de nutrientes requerida, y además el control de malezas, plagas y enfermedades se hace solamente en los puntos que demanden tal control.

La aplicación del concepto de agricultura de precisión puede comenzar, por ejemplo, a partir de la cosecha –con el mapa de rendimiento– o a partir del conocimiento de la variabilidad del suelo representada en los mapas de rendimiento y/o fertilidad del suelo, respectivamente (**Figura 1.2**).

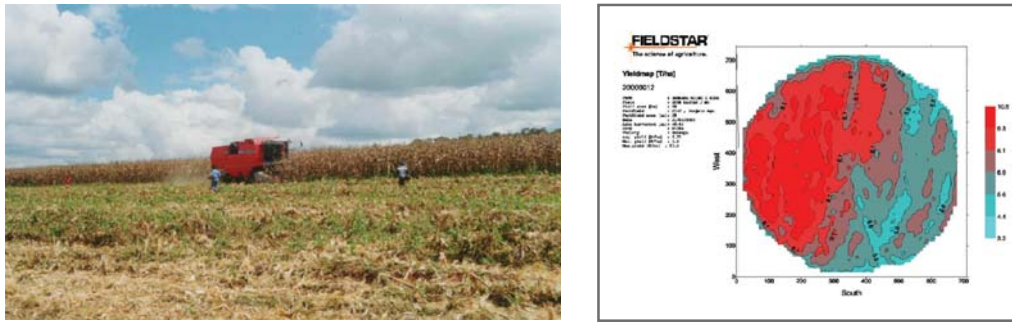


Figura 1.2: Mapa de rendimiento de maíz, campaña 2002 (Embrapa, Estación Experimental Maíz y Sorgo, Sete Lagoas, MG, Brasil).

Todo eso se basa en el estudio de variabilidad del suelo y de la planta, con el fin de establecer tendencias de rendimiento dentro de una misma área y también, a lo largo del tiempo, con las variaciones climáticas y modificaciones del suelo. Cuando el rendimiento y/o la fertilidad de un lote no varían, es probable que el incentivo para adoptar las técnicas de agricultura de precisión sea muy escaso desde el punto de vista de la optimización de la producción (no así desde el punto de vista de la gestión de la empresa agropecuaria). Sin embargo, si se detecta una elevada variación de productividad, la adopción de esas técnicas puede ser beneficiosa, pues reduce las distorsiones comprobadas normalmente en el área de producción.

Por lo tanto, para entender y aplicar la agricultura de precisión, es necesario definir dos conceptos básicos:

1. *Variabilidad espacial:* expresa las diferencias de producción en un mismo campo, en una misma campaña y cosecha (**Figura 1.2**).

2. *Variabilidad temporal:* expresa los cambios de producción en un mismo campo, en distintas campañas de cosecha (**Figura 1.3**).

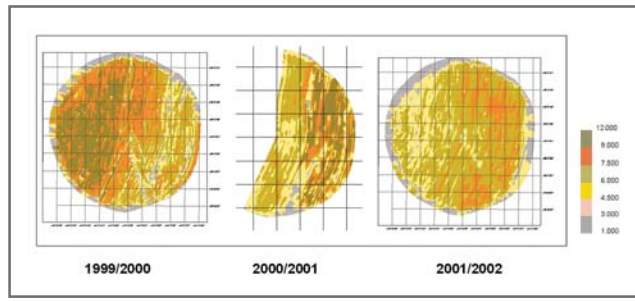


Figura 1.3: Variabilidad temporal del rendimiento de maíz, campañas 2000, 2001 y 2003 (Embrapa, Estación Experimental Maíz y Sorgo, Sete Lagoas, MG, Brasil).

Sin embargo, las prácticas de manejo localizado no se basan solamente en mapas de productividad o de fertilidad del suelo. La toma de decisiones en agricultura de precisión puede realizarse a partir de una base de datos, registrada en un mapa, o de información obtenida en el preciso instante en que se llevará a cabo determinada acción, utilizando para ello la información obtenida por sensores "en tiempo real".

La frecuencia del muestreo se puede producir en intervalos de meses o años, como, por ejemplo, en el caso de corrección de suelos, o bien, cuando la característica cambia rápidamente, puede ser interesante para el productor medir la variabilidad en tiempo real y proveer, instantáneamente, el insumo necesario, sin muestreo previo. Un ejemplo de esta situación sería la aplicación de nitrógeno basada en la información de los sensores en tiempo real (**Figura 1.4**).

Figura 1.4: Sensor en tiempo real para la aplicación de nitrógeno con dosis variable (Yara, 2005)

La aplicación del concepto de la agricultura de precisión está siendo posible gracias a la evolución de cinco tecnologías, que se expondrán en los capítulos siguientes: (1) Sistema de Posicionamiento Global (GPS); (2) Sistemas de Información Geográfica (SIG); (3) Percepción remota; (4) Tecnologías de dosis variable (sensores, controladores, etc.); y (5) Análisis de datos georeferenciados (Geoestadística, Econometría Espacial, Análisis multifactorial, Análisis de Cluster y CART, etc.).

Esta nueva filosofía de producción agrícola utilizando tecnología de información responde a las exigencias de un mercado competitivo, que requiere mayor volumen de producción, precios más bajos y utiliza técnicas y sistemas que evitan la contaminación ambiental.

ANTECEDENTES Y EVOLUCIÓN

Se pueden describir dos líneas de desarrollo de la agricultura de precisión para entender mejor sus antecedentes y su evolución hasta el día de hoy: la agronómica y la ingeniería agrícola.

La **línea agronómica**, citada por Robert (1999), refiere a los trabajos de las décadas del '70 y '80, en Minnesota, Estados Unidos, sobre la utilización de métodos de investigación de campo para conocer mejor la variabilidad de los factores de suelo y planta, incluyendo análisis de suelo, muestreo del suelo, fotografía del área y análisis de cultivos. Gracias a la unión de esfuerzos de las empresas CENEX, FARMERS Union Central Exchange Inc. y la compañía de computadoras Control Data Corporation, ambas con sede en Saint Paul y Miniápolis, Minnesota, Estados Unidos (EE.UU.), fue posible establecer el primer concepto de variabilidad de suelo y planta en los campos así como los potenciales beneficios del gerenciamiento de estos campos por zona de manejo, en vez de toda el área sembrada.

La **línea de la ingeniería agrícola** se refiere a la evolución de las máquinas agrícolas, utilizando sensores y sistema de posicionamiento global (GPS) para mapeo y aplicación de insumos con dosis variada. De acuerdo con Blackmore (1997), la empresa Massey Ferguson fue, en 1982, la primera compañía en producir una cosechadora comercial con sistema de mapeo de productividad de granos. Luego, ya al comienzo de los años '90, aparecieron los proyectos de John Deere, Case, AGCO y New Holland.

En la mayoría de las cosechadoras disponibles en el mercado mundial, que operan dentro del concepto de agricultura de precisión, encontramos los siguientes componentes del sistema de monitoreo de rendimiento de granos (Morgan and Ess, 1997):

- Sensores para medir el flujo de los granos;
- Humedad de los granos;
- Velocidad de cosecha;
- Indicador de posición de la plataforma de corte de la cosechadora;
- Monitor de funciones de las operaciones; y
- GPS.

Los mapas de rendimiento de granos se elaboran a partir de la información recibida por esos sensores y procesada por un software como, por ejemplo, un Sistema de Información Geográfica (SIG).

De acuerdo con Moore (2000), a lo largo del tiempo, se produjo el siguiente esquema de desarrollo:

1982	Desarrollo del monitor de rendimiento
1984	Desarrollo del sistema de posicionamiento
1985/96	Desarrollo de la tecnología de dosis variable
1991	Primer sistema de monitoreo de rendimiento vendido en Europa
1996	Lanzamiento de los modelos comerciales de monitoreo de rendimiento: Field Star, Green Star, etc.

ADOPCIÓN DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

La cuantificación del uso y adopción de una tecnología no es tarea fácil y, en el caso de la agricultura de precisión, se ha medido por la cantidad de monitores de rendimiento comercializados. Como ejemplo de evolución del uso de ese concepto, los siguientes números, proporcionados por los fabricantes de máquinas cosechadoras con sistema de mapeo, muestran que existe una tendencia creciente de su utilización en algunos países:

- 1992 – primeros tests de campo en EE.UU.
- 1997 – EE.UU. y Canadá ..... 17.000 monitores
- 1998 – Gran Bretaña ..... 350 monitores
- 2004 – Alemania ..... 500 monitores
- 2004 – Brasil ..... 250 monitores
- 2004 – Australia ..... 800 monitores
- 2005 – Argentina ..... 1500 monitores
- 2005 – EE.UU. ..... 35.000 monitores

A pesar de que estas cifras, al mostrar cantidades referentes al uso de monitores de cosecha indican una idea positiva sobre la adopción de la agricultura de precisión, distan de representar la realidad sobre el uso del concepto, pues se refieren solamente a una de las herramientas disponibles para la práctica de mapeo de la productividad (mapas de rendimiento). No están incluidas, en esos números, otras herramientas ya disponibles y comercializadas.

En Brasil, por ejemplo, se estima que más de 100.000 hectáreas de suelo ya están siendo corregidas por los sistemas de aplicación con dosis variable, si bien, en muchas de esas áreas no se utilizan ni se registran mapas de rendimiento, estando, por lo tanto, fuera del cómputo general de adopción de agricultura de precisión arriba descrito. Asimismo, se dejaron de tomar en cuenta datos de varios países también por falta de estadística más ajustada sobre este tema.

AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN CULTIVOS TRADICIONALES

Los sistemas tradicionales de producción tratan a las propiedades agrícolas de forma homogénea, tomando como base las condiciones promedio de las extensas áreas de producción para implementar las acciones correctivas de los factores limitantes. Con el fin de obtener unos sistemas de producción más competitivos y aumentar la eficiencia agronómica del sector productivo, se incorporaron nuevas técnicas para incrementar y/o mantener la productividad de los cultivos, buscando, al mismo tiempo, reducir los costos de producción. En ese contexto, la optimización del uso de insumos a través de la agricultura de precisión es una alternativa que establece una manera diferenciada de manejo del sistema de producción, buscando promover la estabilidad de la producción a través de la maximización del retorno económico y preservando el medio ambiente.

Conceptualmente, la agricultura de precisión es una nueva forma integrada de gerenciamiento de la información de los cultivos, basada en la existencia de la variabilidad espacial y temporal de la unidad mínima de manejo en la agricultura tradicional (Saraiva et al., 2000).

Según Cigana (2003), el resultado de la cosecha de dos lotes con soja y maíz que suman 265 hectáreas, en la región del Planalto Médio "Gaúcho", en Río Grande del Sur, Brasil, confirman el aumento de productividad y la reducción de costos prometida por la agricultura de precisión. En el lote de 132 hectáreas cultivado con maíz, el rendimiento alcanzó 5.880 kg/ha. El resultado es 20% superior al promedio regional, 4.680 kg/ha. El número también es 13% superior al promedio de 5.100 kg/ha obtenido en otros cultivos de la misma propiedad, la Hacienda Anna, donde se aplicaron los métodos convencionales. En las 124 hectáreas sembradas con soja, la productividad llegó a 2.880 kg/ha. El promedio de la región fue de aproximadamente 2.040 kg/ha (29% menos) y el de la propiedad, 2.520 kg/ha (12,5% menos).

El mismo autor señala que la comparación con los demás cultivos de la propiedad demuestra también una reducción de costos en los insumos. En el área cultivada con maíz, se alcanzó un ahorro de 18% en la aplicación de fertilizante. En la agricultura convencional, con la aplicación de dosis fija, se necesitarían 59,4 toneladas (450 kg/ha) de un producto formulado (con fósforo y potasio), a un costo de 390 Reales por tonelada (R$/t), con un total de gastos de R$ 23.166. Ahora bien, con la aplicación de dosis variable, se utilizaron 52 t de Súper Fosfato Simple (SSP), un producto más económico (255 R$/t), 14 t de cloruro de potasio (KCl), por un valor de R$ 414 la tonelada, totalizando R$ 19.056 – un ahorro de R$ 4.110 en las 132 ha. En el cultivo de 124 hectáreas de soja, el ahorro alcanzó el 23%. Con la aplicación de dosis fija, se necesitarían 40,3 t (325 kg/ha), con un costo de 303 R$/t. En este caso, los propietarios tendrían que invertir R$ 12.210. Con la aplicación de dosis variable, disminuyendo el nivel de deficiencia de cada punto del área gracias al análisis del suelo, se utilizaron apenas 31 toneladas de fertilizante, reduciendo los costos a R$ 9.303, un ahorro de R$ 2.817. Multiplicando el área de cultivo por 10, para llegar a la extensión de una hacienda comercial, se economizarían R$ 28 mil y sin contar que, en los puntos donde había deficiencia, se estará produciendo más.

BENEFICIOS POTENCIALES

La adopción de la agricultura de precisión, no solamente como utilización de tecnologías de información, sino como concepto, es un potencial para la racionalización del sistema de producción agrícola moderno como consecuencia de:

- Optimización de la cantidad de agroquímicos aplicados en los suelos y cultivos;
- Consecuente reducción de los costos de producción y de la contaminación ambiental ; y
- Mejora de la calidad de las cosechas.

Si bien es un tema de investigación relativamente nuevo, se han logrado muchos avances, principalmente en el desarrollo de máquinas e implementos que permiten el manejo localizado en base a mapas. Los recursos más avanzados en tecnología de información hoy disponibles, como los sistemas de posicionamiento global (GPS), los sistemas de información geográfica (SIG), los sistemas de control y adquisición de datos, sensores y actuadores, entre otros, están cada vez más presentes en el campo. A pesar de ese avance tecnológico, hay áreas que necesitan desarrollarse aún más para que la agricultura de precisión pueda consolidarse como una solución amplia y plenamente viable, para todos los segmentos de la agricultura.

Se destacan dos grandes áreas de trabajo:

1. El desarrollo de sensores que permitan obtener, en tiempo real, de forma eficiente y confiable, la deficiencia nutricional o de estrés hídrico de la planta durante su desarrollo para aplicación y corrección en el tiempo preciso y;

2. El desarrollo de dispositivos, programas de computación y estrategias que posibiliten una mayor integración de los datos obtenidos, facilitando así la interpretación y análisis de los mapas y haciendo también más efectivo el manejo localizado.

Actualmente, uno de los grandes problemas que se plantea es la magnitud de la correlación de la variabilidad espacial y/o temporal entre los factores asociados al suelo y al desarrollo de los cultivos, incluyendo disponibilidad de nutrientes, materia orgánica, acidez, disponibilidad de agua, textura, distribución de enfermedades, plagas, malezas, etc. La determinación de esos factores es de suma importancia para poder distribuir las cantidades ideales de agroquímicos, fertilizantes o correctivos.

Una de las técnicas que viene llamando la atención de la investigación mundial recientemente, es el procesamiento y análisis de imágenes satelitales, aéreas, o hasta de plataformas instaladas en las máquinas agrícolas (**Figuras 1.5** y **1.6**).

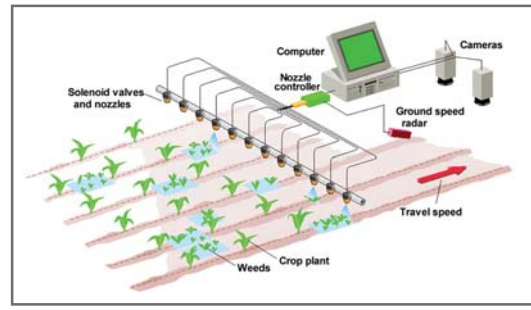


Figura 1.5: Esquema de un pulverizador para control localizado de malezas basado en el procesamiento y análisis de imágenes (UIUC, 2005)

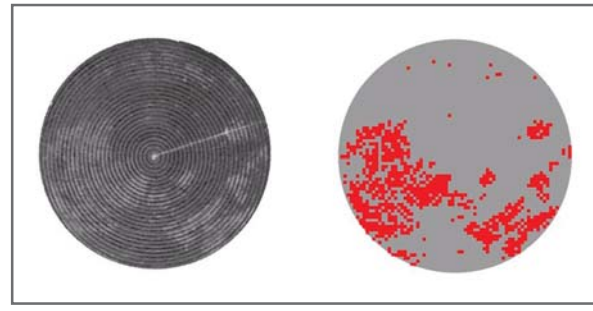


Figura 1.6: Mapa de infestación con malezas en una plantación de café a la derecha, desarrollada en base al procesamiento y análisis de la imagen aérea de la izquierda (Proyecto Cafeicultura de Precisión – Universidad Federal de Viçosa, Brasil)

REFERENCIAS

AGCO. 2005. http://www.fieldstar.com/agco/FieldStar/FieldStarUK/System/DataCollection.htm

Blackmore, S. 1997. An Introduction to Precision Farming. Silsoe College, UK. http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/cpf/papers/precfarm.htm

Cigana, C. A. 2003. Redução de custos prometida pela agricultura de precisão. http://www.portaldoagronegocio.com.br/index.php?p=noticia&&idN=3665 (Acesso em 16/11/2003).

Moore, M. 2000. The Evolution of Fieldstar and Information Technology in European Agriculture. General Marketing Manager of AGCO Global Technologies Group.

Morgan, M. y Ess, D. 1997. The Precision-Farming Guide for Agriculturalists. John Deere Publishing, Moline, IL. 117pp.

Robert, P. C. 1999. Precision Agriculture: An Information Revolution in Agriculture. Agricultural Outlook Forum 1999, St. Paul, MN. February 1999. ASA, CSSA, SSSA: Madison, WI.

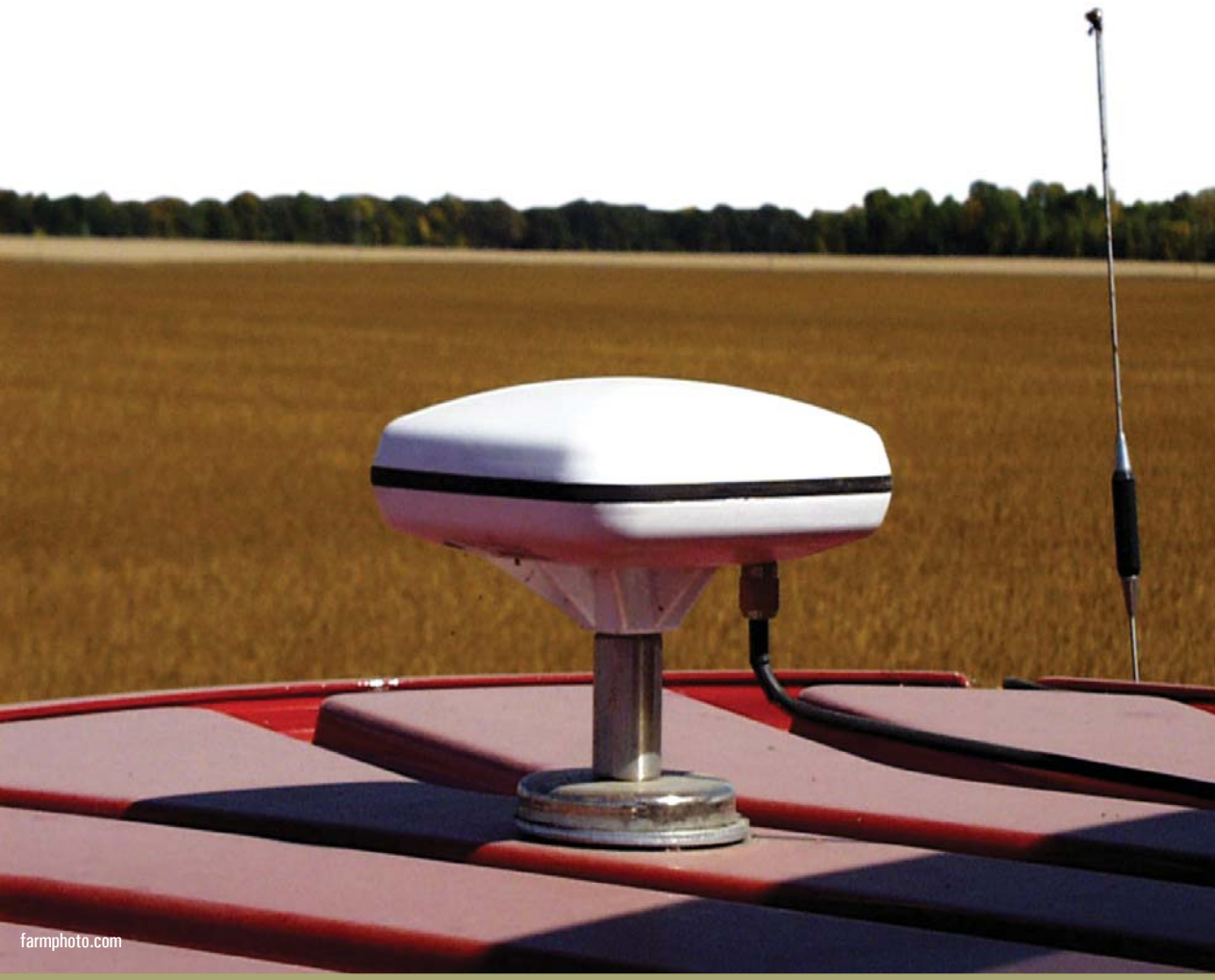
Saraiva, A.M.; Cugnasca, C.E.; Hirakawa, A.R. 2000. Aplicação em taxa variável de fertilizantes e sementes. Borém, A., et al. (Org.). Agricultura de precisão. Viçosa, MG, 2000, p.108-145.

University of Illinois at Urbana-Champaign (UIUC). 2005. Smart sprayer. http://age-web.age.uiuc.edu/remote-sensing/VariableRate.html

Yara. 2005. The three stages of the N Sensor System. http://fert.yara.co.uk/en/crop_fertilization/advice_tools_and_services/n_sensor/the_three_stages/index.html

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO



2.1. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

Marcelino Claret; Stanley Best y **Lorenzo León**
mclaret@inia.cl; sbest@inia.cl; lleon@inia.cl
Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chile

INTRODUCCIÓN

El **Sistema de Posicionamiento Global**, conocido por sus siglas en inglés **GPS** (Global Positioning System), es un sistema de radionavegación satelital operado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América. Este sistema está diseñado para que un observador pueda determinar cuál es su posición en la Tierra, con una cobertura sobre todo el planeta, en todo momento y bajo cualquier condición climática.

Si bien el sistema GPS fue diseñado esencialmente con fines militares, el uso civil se ha difundido debido a su utilidad en las más variadas disciplinas, que van desde las netamente científicas, como la geodesia y tectónica, hasta fines comerciales como el geomarketing, pasando por fines puramente recreacionales. Otro factor importante en su difusión ha sido el bajo costo, ya que el uso del sistema es gratuito. Sólo es necesario contar con un receptor GPS, cuyo precio varía según el nivel de precisión que se quiere obtener.

Los países del Cono Sur experimentan en la actualidad una creciente demanda de información, donde cada vez es más importante la componente espacial. Ya no es suficiente conocer, por ejemplo, la superficie de suelos erosionados o la cantidad de vertederos ilegales como estadística. Ahora es necesario identificar su ubicación para poder acceder a ellos cuando sea necesario verificar, actualizar o corregir la información existente, para tomar decisiones adecuadas y eficientes. En este contexto es cuando el uso de GPS cobra importancia como una herramienta útil para especializar la información.

¿CÓMO FUNCIONA EL SISTEMA GPS?

El sistema GPS se basa en la constelación de satélites NAVSTAR (Navegación por Satélite en Tiempo y Distancia) que comenzó su operación entre los meses de febrero y diciembre de 1978, con el lanzamiento de los primeros cuatro satélites. Luego se llegó a un total de 24 satélites ubicados en seis planos orbitales, que tienen una inclinación de 55º con respecto al Ecuador. Los satélites se encuentran a una distancia aproximada de 20.000 km de la Tierra y describen una órbita elíptica, casi circular, de doce horas de duración.

Con esta configuración se garantiza que en cualquier lugar de la Tierra habrá al menos cuatro satélites sobre el horizonte en todo momento, número mínimo requerido para obtener una posición mediante un receptor GPS (**Figura 2.1**).

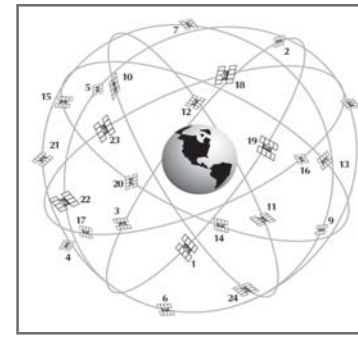


Figura 2.1: Esquema de la constelación NAVSTAR.

El sistema GPS se compone de tres segmentos: **espacial, control y usuario**.

- El **Segmento Espacial** está compuesto por la constelación NAVSTAR ya mencionada, cuyos satélites cuentan con relojes atómicos que permiten garantizar una alta precisión en la generación y emisión de la información que es transmitida vía ondas de radio y que permite a los receptores GPS determinar su posición.

- El **Segmento de Control** está compuesto por bases dedicadas al seguimiento continuo de todos los satélites de la constelación NAVSTAR con la finalidad de asegurar el correcto funcionamiento de cada satélite y determinar su posición en el espacio. De esta manera es posible calcular los parámetros necesarios para predecir dónde se encontrará el satélite en un momento dado. Esta información es transmitida a los satélites por el segmento de control y se conoce como efeméride.

  Las estaciones de control de la constelación son:

  - Colorado Springs (USA). Central de cálculo y operaciones.

  - Ascensión (Atlántico Sur).

  - Hawai (Pacífico Oriental).

  - Kwajalein (Pacífico Occidental).

  - Diego García (Índico).

- El **Segmento de Usuarios** lo componen el instrumental y software utilizados por el usuario para determinar su posición. En general los componentes básicos del receptor GPS son la antena, una sección de radiofrecuencia, un microprocesador, una unidad de control y monitoreo (CDU), unidad de almacenamiento de información y una fuente de energía. Usualmente todos los componentes están incorporados en una sola unidad. Sin embargo, también podemos encontrar los componentes por separado, especialmente la antena.

Para determinar una posición espacial, es necesario que los tres segmentos se relacionen mediante los siguientes pasos:

1. Triangulación de los satélites;
2. Medición de distancia a los satélites;
3. Control del tiempo;
4. Determinación de la posición de los satélites; y
5. Corrección de errores.

1. Triangulación de los satélites

Para determinar una posición sobre la superficie de la Tierra, se calcula la distancia desde el punto geográfico hasta el grupo de satélites que actúa como puntos de referencia de alta precisión. Si conocemos nuestra distancia a un satélite, podemos estimar dicha distancia como el radio de una esfera con centro en el satélite, por lo que nosotros estaríamos ubicados en algún punto de la superficie de esta esfera (**Figura 2.2**).

Al determinar el receptor GPS la distancia a un segundo satélite se puede generar otra esfera, con lo que la búsqueda de nuestra posición se reduce a la intersección de las dos esferas (**Figura 2.3**).

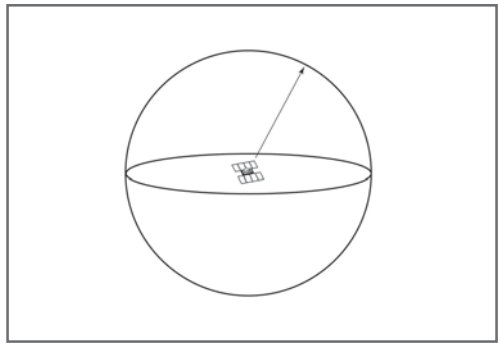


Figura 2.2: Medición de la distancia a un satélite. Nuestra posición es un punto en la superficie de la esfera generada con radio igual a la distancia del satélite al receptor GPS.

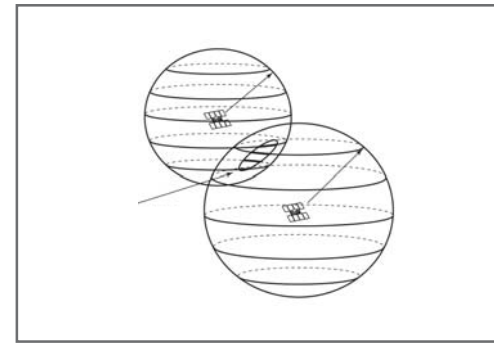


Figura 2.3: Conocida la distancia a un segundo satélite reducimos las posibles posiciones. La intersección de dos esferas es un círculo.

Al conocer la distancia a un tercer satélite la intersección de las tres esferas se reduce a dos puntos (**Figura 2.4**). Una de estas posiciones puede ser descartada como una respuesta no válida, por dar una posición muy lejana de la superficie de la Tierra o porque se mueve a una alta velocidad.

A pesar de que podríamos determinar nuestra posición con sólo tres satélites, metodología conocida como posicionamiento 2D, en la práctica es necesaria la información de un cuarto satélite para resolver adecuadamente las ecuaciones que determinan las coordenadas X, Y, Z y el tiempo, para obtener una precisión aceptable (**Figura 2.5**).

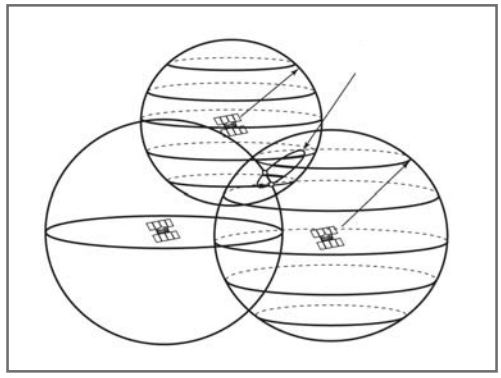


Figura 2.4: Con tres satélites ya podemos determinar una posición en dos dimensiones. La intersección de dos esferas es un círculo.

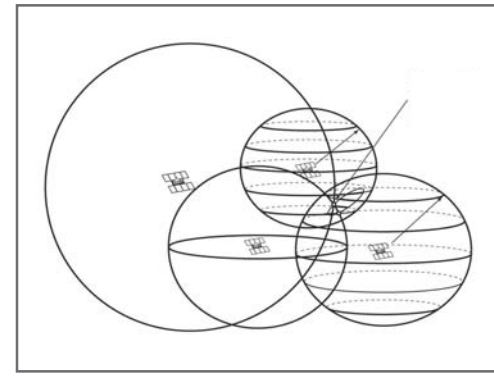


Figura 2.5: Con cuatro satélites podemos obtener una posición confiable. La medición de la distancia a un cuarto satélite reduce las posibilidades a un solo punto.

2. Medición de distancia a los satélites

Para resolver el problema de la triangulación, el receptor GPS primero debe determinar la distancia a los satélites, para lo cual se vale de las señales de radio emitidas por cada uno de ellos, midiendo cuánto tardan en llegar desde el satélite al receptor.

Matemáticamente es un problema sencillo, similar a los problemas del colegio en que se pregunta qué distancia recorre un tren que viaja a 120 km/h durante 2 horas. En el caso del GPS estamos midiendo una señal de radio que viaja a la velocidad de la luz, aproximadamente 300.000 km/seg.

Para determinar cuanto tiempo tarda la señal en llegar, tanto el satélite como el receptor generan una señal con un código pseudo aleatorio en forma simultánea. El receptor GPS examina el código que está recibiendo desde el satélite y determina cuanto tiempo ha transcurrido desde que generó el mismo código. Sólo falta multiplicar este tiempo por la velocidad de la luz y ya tenemos la distancia (**Figura 2.6**).

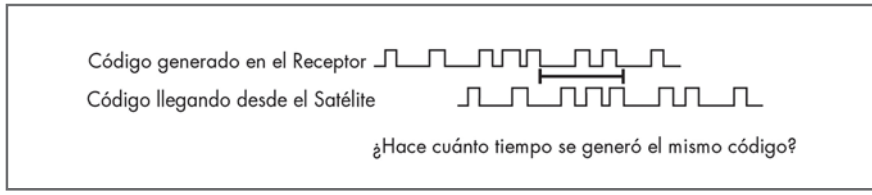


Figura 2.6: Comparación de los códigos pseudo aleatorios del receptor y el satélite, para determinar la distancia que los separa.

El código pseudo aleatorio corresponde a una sucesión muy complicada de pulsos "on" y "off". La complejidad del código permite asegurar que el receptor GPS no se sintonice accidentalmente con otra señal. Esta complejidad también dificulta la interferencia intencional por parte de terceros que pretendan manipular o dificultar el funcionamiento del sistema GPS.

Dado que cada satélite tiene su propio y único código pseudo aleatorio, esta complejidad también permite garantizar que el receptor no se confunda accidentalmente de satélite. Este código le da la posibilidad al Departamento de Defensa de Estados Unidos de controlar el acceso al sistema GPS en caso necesario.

3. Control del tiempo

Vimos que la distancia se determina calculando el tiempo que tarda la señal de radio en llegar al receptor, pero debemos tener presente que si esta medición se realiza con un desvío de una milésima de segundo, a la velocidad de la luz, significa un error de aproximadamente 300 km. Debido a esto, la sincronización de la emisión del código entre el satélite y el receptor debe ser prácticamente perfecta.

Para asegurar una adecuada medición del tiempo, se cuenta con relojes atómicos a bordo de cada satélite, los que cuentan con una precisión de un nanosegundo. Sin embargo, en el caso de los receptores es impracticable el uso de estos relojes, entre otras cosas, debido al altísimo costo que ello implicaría para cada receptor (costos por sobre los USD 50.000 a USD 100.000). Por este motivo se utilizan relojes de menor precisión, los que usualmente son de cuarzo con una alta estabilidad, especialmente diseñados para el uso en el GPS.

Como se explicó más arriba (**Figura 2.4**), se puede calcular una posición con tan sólo tres satélites, pero el sistema ha sido diseñado de modo que permita corregir el error de sincronización en el reloj del receptor, mediante la medición de un cuarto satélite.

Con relojes perfectos la intersección de las distancias a todos los satélites sería un punto único que indicaría nuestra posición. Pero con relojes imperfectos, una cuarta medición, realizada

como control cruzado, no intersectará en el punto calculado con los tres satélites iniciales. Cuando esto ocurre la computadora del GPS atribuirá la diferencia a una desincronización con la hora universal utilizada por el sistema, por lo que el reloj interno será automáticamente adelantado o atrasado hasta que permita que las mediciones de las distancias coincidan en un solo punto (**Figura 2.7**).

De esta forma se puede tener un reloj de precisión atómica en la palma de la mano, por lo que el sistema GPS no sólo trae como beneficio determinar posiciones sino también un control de tiempo altamente preciso.

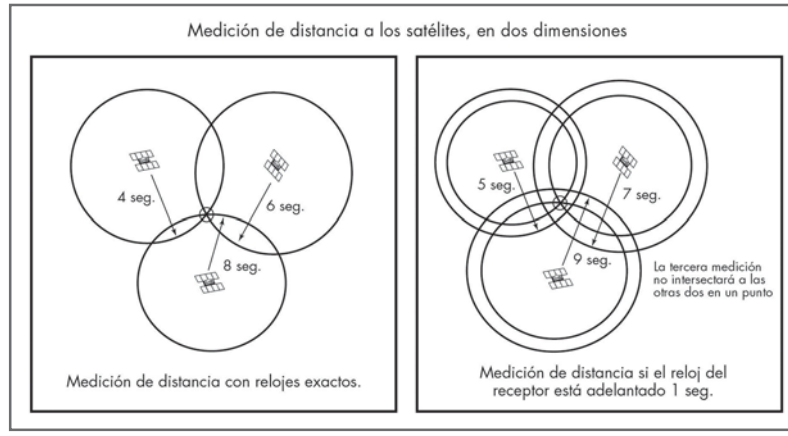

Medición de distancia a los satélites, en dos dimensiones
4 seg.
6 seg.
8 seg.
Medición de distancia con relojes exactos.
5 seg.
7 seg.
9 seg.
La tercera medición no intersectará a las otras dos en un punto
Medición de distancia si el reloj del receptor está adelantado 1 seg.

Figura 2.7: El sistema realiza un ajuste automático del reloj interno del receptor GPS.

4. Determinación de la posición de los satélites

Para utilizar los satélites como puntos de referencia necesitamos saber, exactamente, dónde están en el momento en que se realiza la medición. Recordemos que esta posición será el centro de una esfera de radio igual a la distancia al receptor que, intersectada con otras esferas, nos dará nuestra posición en la Tierra.

Cada satélite de la constelación NAVSTAR está a una distancia aproximada de 20.000 km de la Tierra, en una órbita sumamente estable por lo que también predecible mediante ecuaciones matemáticas.

Los receptores GPS tienen en su memoria un almanaque que les permite saber dónde está cada satélite en un momento determinado. Este almanaque es actualizado con las efemérides que corresponden a los datos que el Segmento de Control transmite a cada satélite, con información sobre las correcciones en los cálculos de las órbitas, luego de los continuos monitoreos realizados por este Segmento, mediante radares muy precisos que les permiten determinar la exacta altura, posición y velocidad de cada satélite.

5. Corrección de errores

Ahora debemos considerar algunas fuentes de error que pueden afectar el funcionamiento del sistema que, en mayor o menor grado, determinan la precisión del posicionamiento. Si bien se

ha calculado la distancia a los satélites utilizando la velocidad de la luz para el desplazamiento de las señales de radio, esto ocurre sólo en condiciones de vacío, por lo que en la realidad la velocidad de viaje de las señales emitidas por los satélites se ve disminuida al pasar por la ionosfera y la troposfera.

Para minimizar este tipo de error algunos receptores realizan ciertas correcciones en base a modelos que permiten predecir el error tipo en un día promedio, pero en la práctica es difícil que las condiciones atmosféricas se ajusten a un promedio previsto. Otro método consiste en comparar la velocidad relativa de dos señales diferentes, para lo que se debe recurrir a receptores de doble frecuencia bastante sofisticados.

Errores en los relojes atómicos y en las órbitas de los satélites son factibles y afectan las mediciones realizadas, pero en general son menores y permanentemente monitoreadas y corregidas por el Segmento de Control.

Otro problema práctico corresponde a que hemos supuesto que la señal que recibe el receptor ha viajado directamente desde el satélite, sin embargo, esta señal puede llegar luego de rebotar en superficies como laderas de montañas, edificios y bosques, siguiendo rutas más largas que las esperadas. Este tipo de error se minimiza mediante el uso de antenas especialmente diseñadas y utilizando avanzados procesamientos de las señales.

La geometría de la distribución de los satélites en el momento de la medición es otro factor que afecta la precisión de las mediciones. Esto se conoce como "Dilución Geométrica de la Precisión" o GDOP. Idealmente la intersección de las distancias a los satélites será un punto, pero debido a que el sistema tiene cierto rango de imprecisión, en realidad la intersección es un área.

Si los satélites se encuentran muy juntos en el espacio, el área de intersección que se produce es muy grande y la precisión baja. Si los satélites se encuentran bien distribuidos en el espacio, los ángulos de intersección son casi rectos y la precisión aumenta (**Figura 2.8**). Los buenos receptores son capaces de determinar qué satélites de los visibles en un momento son los óptimos para disminuir el error por Dilución Geométrica de la Precisión.

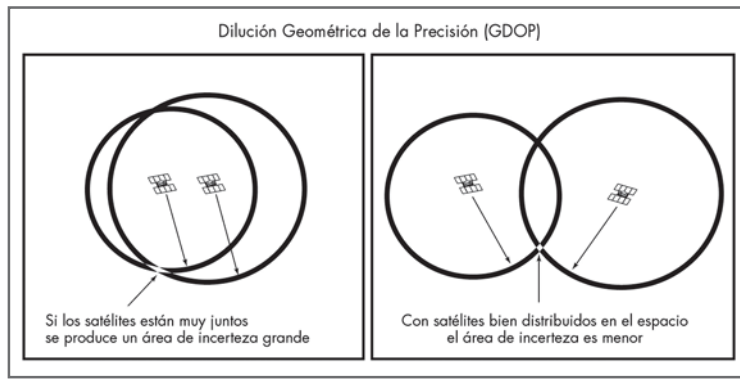

Dilución Geométrica de la Precisión (GDOP)
Si los satélites están muy juntos
se produce un área de incerteza grande
Con satélites bien distribuidos en el espacio
el área de incerteza es menor

Figura 2.8: Influencia de la distribución de los satélites en el espacio sobre el nivel de precisión obtenido, GDOP.

La Disponibilidad Selectiva es uno de los factores que significó mayor degradación en la precisión y exactitud del sistema GPS y se correspondía con a una serie de errores introducidos intencionalmente al reloj de los satélites, por el Departamento de Defensa de Estados Unidos,

para evitar que su propio sistema de radionavegación fuese utilizado en su contra por algún enemigo. Esta degradación de la precisión hacía frecuente errores en la posición del orden de los 100 m en los GPS de uso civil, no así en los de uso militar que se encontraban equipados de modo de evitar esta fuente de error. Finalmente, la Disponibilidad Selectiva fue desactivada en mayo del año 2000 (**Figura 2.9**), ya que no se justificaba degradar la precisión del sistema cuando existen otros métodos de posicionamiento bastante precisos, como es el caso del sistema GLONASS (Global' Naya Navigatsionnaya Sputnikova Sistema o Sistema Global de Navegación por Satélite), símil ruso del sistema GPS que jamás incorporó alguna fuente de error intencional. No obstante, en estos momentos Estados Unidos cuenta con la tecnología que le permite activar la Disponibilidad Selectiva en zonas específicas del planeta que se encuentren en conflicto, sin degradar la precisión del sistema para el resto del mundo.

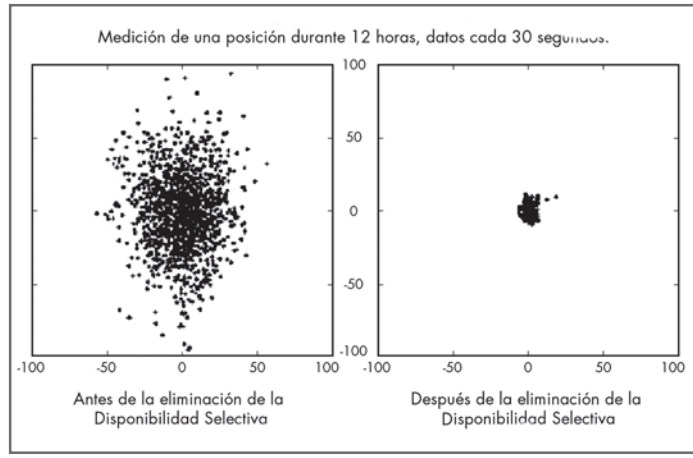


Figura 2.9: Dispersión de las posiciones obtenidas en un solo punto, antes y después de la eliminación de la Disponibilidad Selectiva, expresadas en metros.

CORRECCIÓN DIFERENCIAL DGPS

Debido a la limitación que implicaba la presencia de la Disponibilidad Selectiva, se diseñó una metodología que permitiera eliminar esta fuente de error y a la vez ayudar a corregir los errores atmosféricos.

Si se utiliza un GPS de alta precisión en un punto de ubicación conocida (GPS Base), esperaremos que el GPS nos entregue como resultado esa posición. Si esto no sucede, podemos determinar la magnitud del error ocurrido comparando el resultado obtenido con el resultado esperado. Esta diferencia, expresada para cada eje de coordenadas, puede ser utilizada por otro GPS ubicado en una posición no conocida (GPS móvil) para corregir los resultados que está obteniendo.

Del mismo modo, podemos determinar la diferencia entre la distancia esperada a cada satélite y la obtenida. Así, el GPS móvil realizará la corrección sólo para los satélites que esté utilizando en cada medición.

La información del GPS móvil puede ser almacenada para, posteriormente, realizar la corrección diferencial al comparar los datos con los de un archivo de la estación base. Esta metodología es conocida como **Corrección Diferencial Post Proceso**.

Cuando se requiere una información inmediata de alta precisión se puede utilizar el método de **Corrección Diferencial en Tiempo Real**. En este caso, la información generada por la Base es transmitida al GPS móvil para que en la posición que determine ya incorpore la corrección. En áreas pequeñas se pueden utilizar sistemas de transmisión VHF. Para distancias medias se utilizan transmisores de baja frecuencia como los utilizados por los Radio Faros del Servicio de Guardacostas de los Estados Unidos (sistema WAS). Finalmente, para cubrir extensas áreas, llegando a un continente completo, se recurre al uso de satélites geoestacionarios como, por ejemplo, los de la empresa OmniSTAR (**Figura 2.10**).

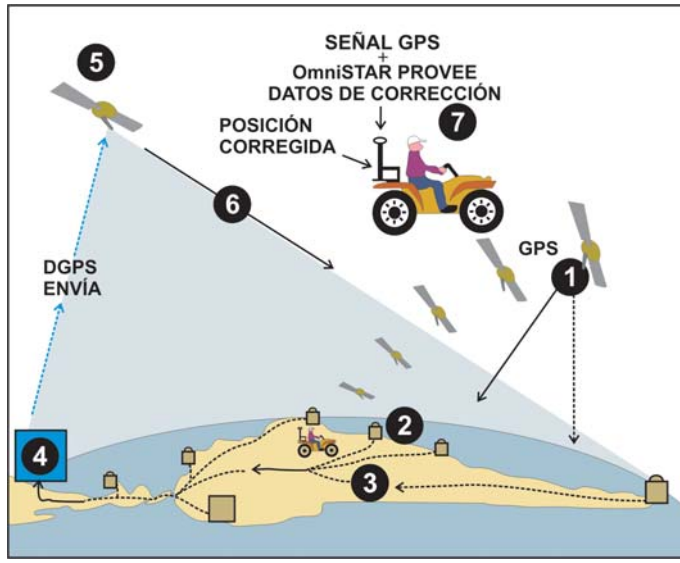


Figura 2.10: Esquema del método DGPS utilizando un satélite geoestacionario de la empresa OmniSTAR.

Luego de que se eliminó la Disponibilidad Selectiva, la principal fuente de error que permite corregir el método diferencial es la atmosférica, que puede ser del orden de los 10 metros aproximadamente (**Figura 2.9**). Debido a la alta variabilidad espacial que manifiesta la atmósfera, idealmente el GPS base y el GPS móvil deben estar dentro de una distancia que les asegure encontrarse bajo las mismas condiciones atmosféricas y de visibilidad de los mismos satélites.

En el caso de utilizar corrección basada en sistemas continentales, se utilizan varias estaciones distribuidas en el área, que calculan la corrección para cada satélite visible en el continente. Esta información es enviada a una central que codifica y comprime la información para luego ser enviada al satélite geoestacionario. Éste retransmite la información para que los receptores diferenciales decodifiquen y descompriman la información. De esta información el GPS utilizará aquella correspondiente a la corrección de los satélites que tenga a la vista desde su ubicación. En este caso, como las estaciones base están ubicadas a gran distancia unas de otras y el GPS móvil puede estar en cualquier lugar dentro del área de cobertura del satélite, es necesario determinar una corrección atmosférica mediante cálculos estadísticos. Para ello, se utiliza un método conocido como distancia inversa, en el que a la corrección determinada por cada estación se le asigna un peso relativo de acuerdo a la distancia a la que se encuentren del GPS móvil. Así, estaciones más cercanas serán más relevantes que aquellas que se encuentren más alejadas, lo que en teoría debería coincidir con el hecho de que las condiciones atmosféricas serán más parecidas en las Bases más cercanas.

SISTEMA DE POSICIONAMIENTO ALTERNATIVO

Incorporación del viñedo al sistema de agricultura de precisión

La incorporación del esquema de agricultura de precisión en el sistema de manejo de un viñedo o huerto frutal específico, significa seguir varios pasos en los que se incorporen cada uno de los elementos tecnológicos que permiten realizar una adecuada captura de información o monitoreo del viñedo o huerto.

Los pasos serían: i) Obtención de un SIG del área del viñedo; y ii) Ubicación geográfica de los centrales u árboles. Este método ha sido incorporado al ser los centrales puntos de referencia bien establecidos y que pueden ser ubicados fácilmente por el personal en terreno, lo que facilita ostensiblemente las labores (**Figura 2.11**). Esto no ocurre así, con el uso de puntos de referencia derivados a partir del empleo de GPS, ya que en muchos casos se puede caer en ineficiencias operativas y poca seguridad en la identificación de los puntos de interés.

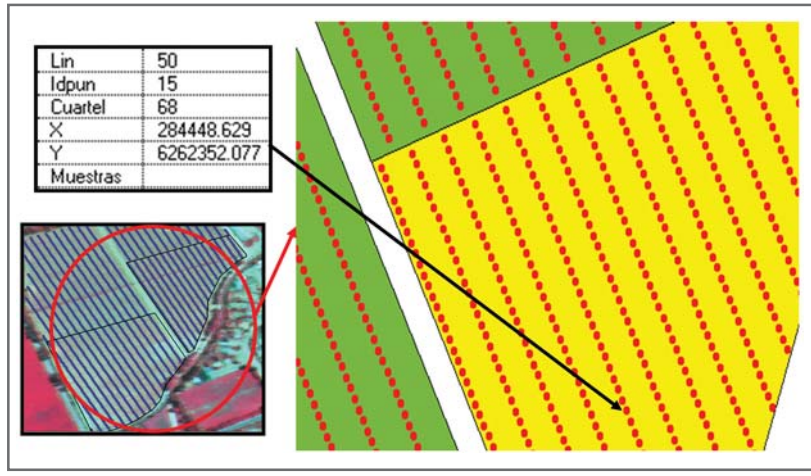


Figura 2.11: Sistema de localización geográfica desarrollado e integración al SIG.

APLICACIONES DEL GPS

El sistema GPS fue diseñado para fines militares, siendo éste el uso primordial para el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América. El uso civil del GPS se ha masificado debido al amplio rango de campos en los que puede ser aplicado.

Este uso en navegación se aplica a transporte terrestre, marítimo y aéreo, aumentando la seguridad de los viajes si se conocen de antemano las zonas de riesgo. Si al receptor GPS se le agrega un equipo que pueda transmitir la posición determinada, se tiene una herramienta de control de flotas que permite saber dónde se encuentra cada vehículo en todo momento. Ejemplo de la utilidad de esta herramienta es el caso de determinar la ambulancia que se encuentra más cercana al lugar en el que se ha producido un accidente.

El uso científico del GPS es muy diverso, apoyando disciplinas tales como: Climatología, Geodesia, Antropología, Arqueología, Topografía, Etología Animal, Medio Ambiente, etc. Se ha utilizado GPS por ejemplo, en el seguimiento de animales en peligro de extinción, en evaluación de los efectos de huracanes y terremotos, y en actualización de cartografía marítima y terrestre.

Un buen ejemplo de las capacidades del sistema GPS es su uso en Agricultura de Precisión, el cual se basa en el principio que aún en áreas pequeñas dentro de las fincas, como por ejemplo cuarteles de frutales, se manifiesta una variabilidad intrínseca que depende básicamente de las condiciones naturales de suelo condicionadas por el clima y una variabilidad que es inducida por el manejo de los cultivos. La captura de datos en terreno para aplicar correctamente esta tecnología depende en forma crítica de la componente espacial, y por ende de coordenadas GPS que por la precisión y exactitud requeridas deben ser obtenidas mediante señales corregidas en forma diferencial. Entonces toda la información que se genera en terreno está siempre georeferenciada para su correcta ubicación dentro de la finca (**Figura 2.12**).

Algunos ejemplos de datos obtenidos son: el lugar donde se toman las muestras de suelo (humedad, fertilidad, conductividad eléctrica, etc.), el monitoreo del rendimiento de los cultivos, área foliar, o la presencia de plagas y enfermedades. Sobre la base de esta información, posteriormente, se tomarán las decisiones de aplicación de tasas variables de semillas, fertilizantes o pesticidas, que determinarán mejoras importantes en los rendimientos y calidad de los productos asociados a un menor impacto sobre el medio ambiente.

Figura 2.12: Toma de muestras de suelo, georeferenciadas con GPS Diferencial.

Equipos que dependen de un DGPS

Los equipos de AP que utilizan DGPS para su correcta operación se pueden diferenciar en dos tipos: aquellos que permiten realizar **monitoreos de parámetros productivos**, tales como monitores de rendimiento y de calidad y otros equipos que permiten la **aplicación de productos en forma diferencial**, es decir, que consideran la variabilidad espacial de los requerimientos del cultivo (agua, fertilizantes) o de plagas y enfermedades (insecticidas, fungicidas).

a) Monitores de Parámetros Productivos

Monitor de Rendimiento

Equipo diseñado para registrar los resultados de cosecha obtenidos con un cultivo en distintos sectores, es decir, un registro de la variabilidad espacial de los rendimientos, los cuales son desplegados en forma de mapas georeferenciados mediante DGPS en tiempo real. Esto permite una rápida interpretación de los resultados de cosecha y también la integración de distintos años, facilitando los análisis temporales útiles para la gestión y toma de decisiones (**Figura 2.13**).

Figura 2.13: Monitor de rendimiento.

En la actualidad, se pueden encontrar estos equipos para cereales, leguminosos, forrajeras y ciertos cultivos industriales.

Monitor de Calidad de Granos

Este sensor instalado sobre una cosechadora de cereales, es capaz de medir el contenido de proteínas y la humedad del grano. Conectado a un DGPS, puede entonces construir mapas de distribución espacial del porcentaje de proteínas en el cultivo (**Figura 2.14**).

Figura 2.14: Monitor de proteína de granos.

Monitor de Calidad de Frutos

Este sensor es un espectrofotómetro infrarrojo cercano, que permite medir contenido de azúcar, pH, taninos y color entre otros, según sea calibrado. Conectado a DGPS permite establecer planos de calidad espacial de la fruta y uvas para vinificación o de mesa (**Figura 2.15**).

Figura 2.15: Monitor de Calidad de Frutos.

Monitor de Contenido de Clorofila

El monitor de clorofila (Spad meter) permite medir los contenidos de clorofila presentes en las hojas de cualquier cultivo. Mediante este valor se obtienen índices de actividad fotosintética y de contenido de nitrógeno en las plantas. Conectado a un GPS, es posible obtener mapas de la distribución espacial de estas variables (**Figura 2.16**).

Figura 2.16: Monitor de Clorofila.

Monitor de Estado Nutricional: N-Sensor

El N-Sensor, permite conocer la variabilidad de la demanda de nitrógeno a través de la reflectancia emitida por el cultivo. Montado sobre un tractor y conectado a un DGPS permite generar mapas de la demanda de nitrógeno del cultivo y realizar aplicaciones de fertilizantes de acuerdo a la misma, establecida en tiempo real (**Figura 2.17**).

Figura 2.17: N-Sensor montado sobre tractor

b) Equipos de Aplicación Variable

Monitor y Controlador de Siembra

Este sensor monitorea en tiempo real las dosis de semillas utilizadas en cada sector. Conectado a DGPS puede generar mapas de la distribución espacial de las distintas dosis de semillas aplicadas (**Figura 2.18**).

Figura 2.18: Monitor de Siembra.

Aplicador Variable de Agroquímicos

Los sensores de aplicación variable de agroquímicos permiten dosificar en forma eficiente la cantidad de pesticidas según el área foliar de los cultivos. Conectados a DGPS permiten obtener mapas precisos de la distribución espacial del producto aplicado (**Figura 2.19**).

Figura 2.19: Monitor de aplicación variable de agroquímicos.

SOFTWARE DE APOYO

La información generada por el GPS es almacenada en la memoria interna del equipo para poder ser utilizada nuevamente en el receptor o para ser transmitida a otros equipos como, por ejemplo, un computador.

Existe una gran variedad de programas de computación relacionados con el uso del GPS, desde aquellos que nos permiten transferir los datos al computador o realizar la Corrección Diferencial Postproceso, a otros con las más variadas finalidades, como puede ser el cambio de proyección, incorporación de los datos a un Sistema de Información Geográfica, sistemas de navegación en tiempo real, etc.

Dentro de los programas de computación que permiten el traspaso de datos desde y hacia un computador, se pueden mencionar a "Garmin PCX5", "Magellan Waypoint" (**Figura 2.20**), "Waypoint+", "GPS Pathfinder Office".

El Software OziExplorer permite tener conectado el GPS a un computador portátil, en el que podemos tener un mapa base y sobre el cual se irá desplazando el cursor a medida que el GPS registre nuestros movimientos.

Muchos de estos programas de computación permiten determinar la configuración de la constelación de satélites sobre el horizonte visible desde un punto determinado, en cualquier momento que se necesite conocer. Esto es útil para determinar qué condiciones de trabajo encontraremos cuando salgamos a terreno o, mejor aún, nos permite determinar cuándo se darán las mejores condiciones de trabajo para así programar las campañas de terreno (**Figuras 2.21** y **2.22**).

Figura 2.20: Software que permite la transferencia de datos entre el GPS y el computador.

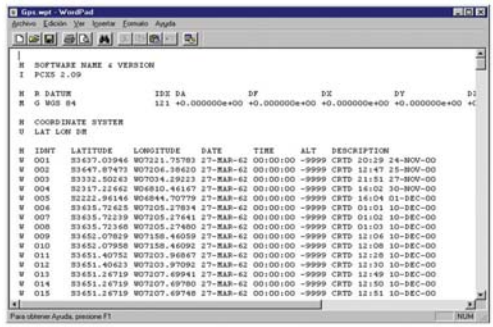


Figura 2.21: Ejemplo de un archivo de posiciones (waypoints) almacenadas en un GPS.

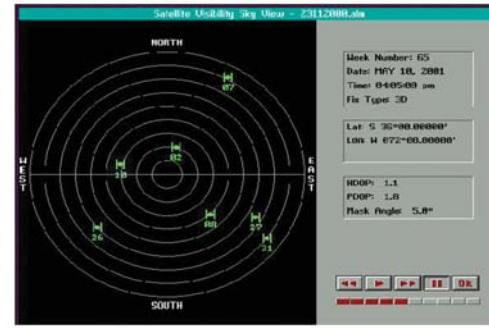


Figura 2.22: Configuración de los satélites para una fecha, hora y posición determinada.

2.2. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL Y SU APLICACIÓN EN AGRICULTURA

Mario Bragachini; Andrés Méndez; Fernando Scaramuzza y Federico Proietti
bragach@correo.inta.gov.ar; andresmendez74@hotmail.com; ferscara@hotmail.com y agprecision@correo.inta.gov.ar
Proyecto Agricultura de Precisión www.agriculturadeprecision.org
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Argentina

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la agricultura de precisión en el Cono Sur de América posee todas las herramientas que se encuentran disponibles para el resto del mundo, desde la base de esta herramienta que es el GPS, continuando con el monitor de rendimiento, software, monitores de siembra, equipamiento para la aplicación de semilla y fertilizante, dosis variable, banderilleros satelitales, sensores remotos (como fotografía aérea, imágenes satelitales, etc.). Otros sistemas que también tienen utilidad para control son los registradores de actividades que se realizan en el campo por cualquier maquinaria (sembradora, pulverizadora, cosechadora, etc.), sistemas de guía (como lo son el autoguía y el volante eléctrico), NIRS sensores en tiempo real de proteína en grano (se mide en la noria de la cosechadora), N sensor (se basa en sensores que leen biomasa e índice verde del cultivo y tienen la posibilidad de hacer la aplicación variable de fertilizante nitrogenado a medida que atraviesa la variabilidad). Éstas, son prácticamente todas las herramientas que se encuentran en el mercado, algunas más costosas que otras y unas con mayor aplicación que otras a campo.

Los programas de computación disponibles cada vez son más utilizados, van aumentando sus prestaciones y potencialidad para el análisis de datos, a la vez que son más amigables para el usuario. En lo que respecta a dosis variable merece un párrafo aparte dado que puede no ser rentable en lotes donde la variabilidad no sea bien definida y/o de escasa magnitud, o donde se hagan recomendaciones sin tener el conocimiento adecuado sobre respuesta a fertilidad, densidades óptimas, etc. Las imágenes satelitales y las fotografías aéreas son de mucha utilidad si podemos leer lo que ellas expresan con las variaciones de colores que reflejan, y dependerá de la información que queremos recabar. Los banderilleros satelitales son una herramienta muy útil en cuanto a seguridad y calidad de aplicación a tal punto que no se justifica tener una pulverizadora autopropulsada sin banderillero satelital.

Las demás herramientas como lo son el N-Sensor o el NIRS, el autoguía (volante eléctrico para guía de maquinaria), necesitan un análisis más detallado de costos / beneficios, según la situación que se pueda plantear en cada campo particular.

Los ensayos cosechados con monitor de rendimiento brindan alrededor de 800 datos por hectárea, a diferencia del dato promedio de rendimiento que se obtenía de los diferentes lotes que se cosechaban de manera tradicional. En lotes con escasa variabilidad el monitor de rendimiento puede brindar información útil sobre cuál es la mejor dosis de fertilización, el mejor híbrido, la mejor variedad, la mejor densidad de siembra, etc., y en lotes con alta variabilidad se puede obtener información de la mejor dosis, híbrido, variedad, densidad de siembra, etc., ya no a nivel de promedio sino para el sitio específico o lo que es lo mismo en los diferentes ambientes que presenta un lote. Ejemplo de sitio específico pueden ser las diferencias entre lomas, medias lomas y bajos, suelo sódico, con tosca, ambiente con influencia de napa freática, etc., lo cual va a ser útil al momento de recomendar dosis o densidades para cada ambiente.

Los beneficios agronómicos pueden ser menores al 10%, en algunos casos con mayor y en otros con menor cantidad de insumos, o sea con menores costos. Esas diferencias con los actuales márgenes pueden ser muy significativas en un resultado de rendimiento. Ejemplo: si el costo de un cultivo de maíz es 8.000 kg/ha, extraer 9.000 kg/ha cambia totalmente el resultado del negocio. Se sabe que ello implica conocimientos agronómicos y la utilización de herramientas de agricultura de precisión que cada día están más al alcance para mayor cantidad de usuarios.

Seguramente en un país que subfertiliza, que no rota adecuadamente los cultivos, hablar de manejo de la variabilidad dentro de un lote no parece adecuado. Sin embargo, conocer los resultados de los ensayos exploratorios e iniciarse en el tema parece prioritario a corto plazo.

Las cosechadoras con monitor de rendimiento y GPS permiten cosechar datos confiables para luego obtener un correcto diagnóstico de factores que afectan el rendimiento, permiten extraer conclusiones ricas en información, que facilitan la caracterización de los ambientes dentro de un lote o campo para posteriormente realizar un manejo eficiente de insumos en cada ambiente.

UTILIZACIÓN DEL GPS COMO BANDERILLERO SATELITAL

El funcionamiento de los banderilleros satelitales se basa en el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), mediante el cual la maquinaria de aplicación de productos químicos o fertilizantes está ubicada en tiempo real en un lugar del espacio, constantemente.

Para el uso de banderilleros satelitales no se pueden usar GPS autónomos (de mano) dado que el error es muy significativo, se deberían usar GPS con señal correctora o receptores de GPS que posean un software interno que calculan el error que es inducido por la ionosfera (pero en tiempo real). Tampoco sería útil para banderilleros satelitales GPS que calculan el error en post proceso, dado que la maquinaria debe aplicar en el preciso momento que va avanzando.

El **Cuadro 2.1** compara diferentes sistemas de corrección de la señal GPS usados en agricultura.

Cuadro 2.1: Resumen de las diferentes opciones de GPS

Servicios de correcciones DGPS submétricas	Método	Cobertura	Precisión
Waas	Satelital	Norteamérica	Mejor de 2 m
Egnos	Satelital	Europa	Mejor de 2 m
Omnistar	Satelital	Sudamérica	Mejor de 2 m
Beacon	Tres antenas que son bases correctoras en Argentina	Aproximadamente 300 km de radio a antena base	Depende de la distancia a la base correctora. Resultado típico submétrico.
E - dif	Corrección electrónica Interna	Global. Todo el mundo.	Submétrica
Correcciones RTK	Base propia	Hasta 10 km de la base propia.	Centimétrica

Utilidad de los banderilleros satelitales

Los sistemas de guía satelital para ser utilizados en pulverización, fertilización o en sembradoras de grano fino de gran ancho de labor ya son una realidad. Básicamente todos los programas de computación de banderilleros satelitales cuentan con las mismas funciones para la aplicación y uso a campo, los cuales son muy completos y contemplan todas las situaciones que se pueden presentar durante el trabajo.

Considerando el costo del agroquímico, o bien el daño por un mal control ocasionado por solapamiento o áreas sin aplicar, sumado al efecto de fitotoxicidad por sobredosis, indican la necesidad de marcadores eficientes.

En Latinoamérica, la guía en pulverizadoras se realiza de dos maneras diferentes:

A- Mediante dos personas que contando pasos entre una pasada y otra se posicionan para que el operario los utilice como guía (banderilleros). Las desventajas de este sistema son, primero la inexactitud de medir las distancias con pasos, segundo el riesgo de contaminación crónica con agroquímicos al estar permanentemente expuesto a la acción nociva de los mismos y los inconvenientes de salud que ello implica. Otra desventaja es la imposibilidad de marcar en trabajos nocturnos, falta de visión cuando se trabaja en tiradas largas y con cultivos altos. La única ventaja del sistema estaría en que los operarios pueden ayudar al conductor durante las recargas de agua y agroquímico.

B- Mediante el uso de marcadores de espuma, sistema que presenta el problema de falta de precisión, ya que este marca dónde termina la aplicación anterior y no representa una guía perfecta para el operario ya que siempre tendrá que calcular la dirección. Este sistema también presenta como desventaja la dificultad de ver la espuma en cultivos altos o rastrojos en pie.

Los dos sistemas anteriores presentan como desventaja, que los errores cometidos en las sucesivas pasadas son acumulativos, con respecto a las líneas paralelas trazadas por un banderillero satelital, lo que causaría una merma importante en la eficiencia, sobre todo en lotes grandes.

Novedad del 2005 – Guía satelital automatizada

Algunas empresas promocionan el sistema diciendo que en los próximos cinco años el sistema auto-guía será el responsable principal de las modificaciones en el escenario de la maquinaria agrícola, además de promocionar la aplicación de este sistema en todos sus productos.

El sistema de auto-guía automatiza el direccionamiento de un equipo agrícola, permitiendo un trabajo de mayor calidad, condiciones antes imposibles. El operador trabaja con precisión de noche y en condiciones de baja visibilidad, por más tiempo y con menos desgaste físico, lo que permite aumentar la concentración en otras tareas más importantes.

También le permite al operador trabajar en campos con curvas de nivel y ayuda a reducir la superposición y las zonas sin aplicar.

Un factor muy importante para destacar es que el operador posee más confort, lo que reduce el cansancio del mismo y optimiza la eficiencia de aplicación de productos herbicidas, insecticidas, fertilizantes, etc.

Este sistema todavía no ha sido autorizado con automatización total, solamente por cubrir normas de seguridad de riesgo laboral y otros riesgos fuera del campo.

En este momento Trimble ha desarrollado un volante de guía que es más fácilmente adaptable a cualquier maquinaria (círculo rojo de la **Figura 2.23**). En la Figura se puede observar cómo este motor eléctrico por medio de un accionador hace girar al volante de la maquinaria que va a ser guiada (pulverizadora, cosechadoras, tractores, etc.). Además tiene como ventaja que en media hora se puede instalar en una máquina con tan sólo una llave (herramienta).

La ventaja es que si lo sacamos no se nota su montaje anterior, dado que no hace falta ninguna interfase hidráulica.

Figura 2.23: Piloto automático montado sobre un tractor.

DESARROLLOS LOCALES

En el Cono Sur de América existen empresas que, basadas en el equipamiento que unos años atrás se importaba desde otros países como EE.UU., comenzaron a desarrollar monitores, controladores y actuadores e inclusive algunos programas para el manejo de esos datos georeferenciados que fueron haciendo más simple y más económica la adquisición de algunos de estos productos. Ejemplo de estas empresas en Argentina han sido Verion/Agrometal, D&E SA, Oleohidráulica Di Rocco, Yomel/D&E, Abelardo Cuffia, todas en dosis variable ya sea en semilla y/o fertilizantes. También en otros rubros como lo son registradores, monitores de siembra, banderilleros hubo desarrollos nacionales de las empresas D&E SA, Landtech, Agrometal, ERCA, Sylcomp, Abelardo Cuffia, Plantium, Fushiva, Atenti, entre otros.

En este momento en el mercado sudamericano de dosis variable en sembradoras existen desarrollos que pueden realizar tres cambios independientemente, como ser en sembradoras que tengan posibilidad de doble fertilización. Los cambios serían variar el fertilizante en la línea, al costado (fertilización doble) y la densidad de siembra simultánea e independientemente.

CONCLUSIONES

Se puede decir que el productor sudamericano dispone de casi todos los desarrollos mecánicos y electrónicos inteligentes disponibles a nivel mundial en lo que respecta a agricultura de precisión.

Solo hace falta un buen diagnóstico agronómico y/o económico de la situación más apropiada para cada una de las herramientas cuando se va a realizar la inversión en alguna de ellas y en el caso de la dosis variable dependerá de cada campo en particular y dentro de ello comprender que hoy, los lotes o ambientes de manejo están definidos por coordenadas GPS y no por un alambrado o camino como se hacía con la agricultura convencional.

Las empresas locales en el rubro de electrónica de alta complejidad han tenido un gran avance sustituyendo importaciones y comenzando un proceso de exportación.

CAPÍTULO 3

MONITOREO DE RENDIMIENTO Y ELABORACION DE MAPAS

3.1. CULTIVOS TRADICIONALES

Mario Bragachini; Andrés Méndez; Fernando Scaramuzza y Federico Proietti
bragach@correo.inta.gov.ar; andresmendez74@hotmail.com; ferscara@hotmail.com y agprecision@correo.inta.gov.ar
Proyecto Agricultura de Precisión www.agriculturadeprecision.org
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Argentina

MONITORES DE RENDIMIENTO

Los monitores de rendimiento han sido diseñados con el objetivo de recolectar datos para su posterior análisis. Los datos almacenados por hectárea son alrededor de 600 puntos dependiendo de la frecuencia con que son grabados los datos en la tarjeta. La superficie que abarcan los puntos de rendimiento está compuesta por el ancho de la plataforma de la cosechadora y la distancia recorrida por la cosechadora en el tiempo que tarda en grabar un dato y otro. A su vez, si el monitor de rendimiento de la cosechadora está conectado a un GPS esos datos componen un mapa de rendimiento.

Los mayores avances que se logran en lo que respecta a monitores de rendimiento son en las pantallas y en la simplicidad de los programas de mapeo, que han ido logrando las diferentes empresas para comodidad del usuario. Básicamente, se han logrado transformar a los monitores que poseían gran cantidad de teclas, en monitores de pantalla activa, pudiéndose visualizar en la pantalla de cuarzo las teclas que el usuario deberá apretar para pasar de una pantalla a otra, que conducen a un objetivo, como puede ser información general de lotes, cargas, velocidad, flujo de trabajo, rendimiento, etc., o también, acceder a pantallas de calibración de peso, distancia, humedad, vibración entre otros factores dependiendo del monitor con el que se trabaje.

Los monitores son muy similares en cuanto a la información que brindan pero tienen una serie de diferencias en la calibración de los mismos. Por ejemplo, todos los monitores miden rendimiento, humedad (AGCO ya los posee en la serie de cosechadoras Gleaner y Massey de mayor tamaño pero no en los modelos anteriores), flujo, velocidad, cuenta hectáreas, entre otros. En lo que respecta a calibraciones todos los monitores deben ser calibrados en peso, humedad (excepto AGCO según modelo), y distancia (se debe corroborar en caso de no ser medida por GPS). *Calibración se verá con mayor detalle más adelante*.

La **Figura 3.1** muestra los diferentes tipos de monitores de rendimiento más difundidos.

Figura 3.1: Monitores de rendimiento más difundidos.

TARJETAS DE MEMORIA PARA ALMACENAR DATOS

En lo que respecta a tarjetas que almacenan datos de cosecha se conocen básicamente **dos tipos: SRAM** y **ATA Flash** (**Figura 3.2**). Las tarjetas SRAM por lo general son de 1 MB de capacidad y pueden almacenar 48 horas de datos, si el intervalo de registro es cada 3 segundos. A las **tarjetas SRAM** las utilizan los monitores Ag Leader 2000.

Figura 3.2: Tarjeta SRAM (izq.) y Tarjeta ATA FLASH (der.)

En el caso de las **ATA Flash** (que externamente son idénticas a las SRAM) son utilizadas por casi todos los monitores de rendimiento de Ag Leader (PF 3000, PF Advantage e Insight) adoptadas por John Deere y CASE / New Holland. En el caso de AGCO / Massey Ferguson utilizan ATA Flash pero solamente puede ser leída por un lector adaptador externo, dado que la tarjeta posee una ranura especial. Las tarjetas ATA Flash para monitor de rendimiento funcionan bien hasta la capacidad de 64 MB, las de mayor tamaño poseen dificultades en su funcionamiento. Una tarjeta de 64 MB grabando datos cada 3 segundos puede almacenar alrededor de 3.000 horas de cosecha. Con este razonamiento se podría estimar que esa tarjeta se puede ingresar al monitor al iniciar la cosecha y extraerla cuando termina la campaña. Pero lo ideal es bajar los datos periódicamente para tener mayor seguridad en cuanto al registro de datos y poder prevenir cualquier inconveniente que surja en el almacenado.

SOFTWARE DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN

La cosecha con monitor de rendimiento no termina con el registro de datos en si misma, sino que una vez almacenados en la tarjeta, es de suma importancia poder observar los valores de rendimiento en un mapa. Para realizar esta última tarea existen varios programas que permiten "leer" el mapa de rendimiento, agrupados en dos tipos: los específicos, desarrollados por las mismas empresas que proveen los monitores, que en general sólo leen los datos de su monitor; y los generales, que son aquellos que permiten leer datos de varios tipos de monitores y poseen potentes herramientas de análisis.

La causa de por qué no todos los programas leen todas las extensiones para realizar los mapas de rendimiento, es que no todos hablan el mismo lenguaje con el cual se almacenó el dato.

Los programas específicos pueden ser clasificados en "abiertos" y "cerrados", la diferencia entre estos dos subgrupos es la amplitud de programas que permiten acceder al mapa generado por el monitor. Entre los "abiertos" se encuentran el JD MAP y JD Office de John Deere, los cuales leen los datos de los monitores de la serie 50 y 60 respectivamente, el formato que utiliza el de serie 50 es .gsy y el de la serie 60 es .gsv. Otro programa es el Instant Yield Map de Case/New Holland. En un principio estas cosechadoras utilizaban los monitores de Ag Leader pero en la actualidad utilizan los monitores AFS y el formato es .yld el cual es el mismo que utilizaba anteriormente.

El tercer programa pertenece a la firma AGCO, es un software que se denomina "cerrado" ya que el mismo no puede ser leído por ningún otro software que el provisto por la misma empresa y que a su vez, para poder leer los datos de este monitor es necesario también una lectora de tarjeta especial. Sin embargo, una vez dentro del programa es posible exportar los datos a los distintos formatos de mapas lo cual permite que pueda ser leído por otros sistemas de información geográfica.

Dentro de los programas generales se encuentra el Farm Works que en sus últimas actualizaciones permite bajar los datos de varios tipos de monitores de rendimiento, Ag Leader, John Deere, Case / New Holland, entre los más conocidos. Otro programa que recién está saliendo al mercado es el SMS, de la empresa Ag Leader, que permite leer los datos de todos sus monitores lanzados al mercado (Ag Leader 2000, PF 3000, PF Advantage, Insight) y también de la empresa Case / New Holland y John Deere, entre los más destacados.

También dentro de los programas generales está SSToolbox que permite leer los datos de varios monitores de rendimiento. Este software además procesa los datos para varias actividades, como son análisis de ensayos, grillas para muestras de suelo, interpolación de datos, correlación con diferentes resultados de muestreos de suelo y zonas de manejo, etc.

Los operarios necesitan capacitación permanente en el manejo de monitores y software. Esta capacitación es de gran utilidad y cumple con dos objetivos principales: evaluación de ensayos (de híbridos, dosis de fertilización, variedades, etc.); y para conocer la variabilidad de rendimiento (si existiera) debida a condiciones naturales de génesis de suelo o a topografía. Estos datos deben ser un reflejo de la realidad del lote cosechado ya que su posterior análisis se utilizará para la toma de decisiones futuras.

CALIBRACIÓN DEL MONITOR DE RENDIMIENTO

Monitor de rendimiento

Para poder calcular el rendimiento, el monitor debe poseer una serie de sensores que van instalados en la cosechadora, y cuyo objetivo es medir y grabar el rendimiento y la humedad del grano a medida que se cosecha el cultivo. Si a su vez, se le adiciona un GPS podemos obtener los datos de rendimiento geoposicionados, lo que se llama **mapa de rendimiento**. Cada punto de rendimiento representa al ancho de cabezal por la distancia recorrida por la cosechadora cada un tiempo de grabado de datos que se maneja desde el monitor según necesidad (algunos monitores poseen entre 1 a 15 segundos). A mayor cantidad de tiempo de grabación de datos, menor densidad de puntos de rendimiento por hectárea.

Los datos necesarios para el cálculo del rendimiento son (**Cuadro 3.1**):

1. Flujo de grano por unidad de tiempo.
2. Humedad del grano.
3. Velocidad de avance de la cosechadora.
4. Ancho de corte del cabezal.
5. Señal GPS si se quiere obtener la georefenciación de los datos para hacer el mapa de rendimiento.

Cuadro 3.1: Datos que ingresan a la tarjeta PCMCIA (latitud y longitud GPS) y a la consola del monitor para obtener el mapa de rendimiento

Latitud / Longitud	Velocidad km/h	Flujo de grano (t/h)	Ancho de corte (m)	Rendimiento húmedo (kg/ha)	% de humedad	Rendimiento seco (kg/ha)
GPS	Sensor	Sensor	Dato ingresado	Calculado	Sensor	Sensor

Los componentes necesarios en la cosechadora para obtener mapas de rendimiento (**Figura 3.3**) son:

1. Sensor de flujo de grano.
2. Sensor de humedad de grano.
3. Sensor de velocidad de avance.
4. Switch de posición del cabezal.
5. Consola del monitor, Ag Leader de CASE / New Holland, Green Star de John Deere, Field Star de Massey Ferguson y AGCO Allis, etc.
6. Receptor GPS o DGPS.

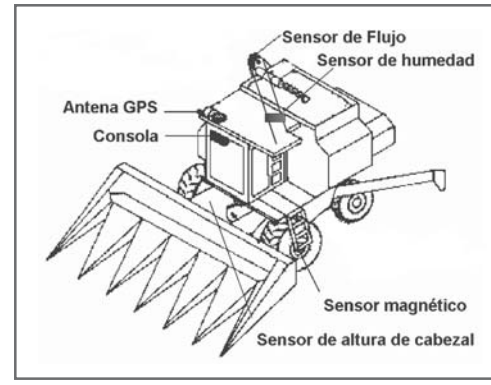


Figura 3.3: Componentes de un monitor de rendimiento con posicionamiento satelital y su ubicación en la cosechadora.

Los mapas de rendimiento permiten cuantificar la variabilidad de rendimiento existente durante la cosecha de un cultivo dentro del lote, quedando grabada espacialmente.

La variabilidad de los lotes es uno de los factores que pueden justificar la realización de dosis variable en la siembra, fertilización, pulverización, etc. y gracias al GPS y algunas herramientas de la agricultura de precisión, entre ellas el monitor de rendimiento, podemos conocer el área que ocupa cada sitio y cuantificar sus diferencias de rendimiento.

Se puede observar (**Figura 3.4**) un ejemplo de mapa de rendimiento que muestra la variabilidad que posee el cultivo de maíz, debido a génesis de suelo. Zonas de mayores rendimientos (colores azules, suelos profundos y bien desarrollados) y zonas de menores rendimientos (colores rojos, donde poseen pH alto en superficie debido a problemas de sodio). Los rendimientos varían desde 2500 kg/ha (colores rojos) de maíz a más de 7500 kg/ha (colores azules).

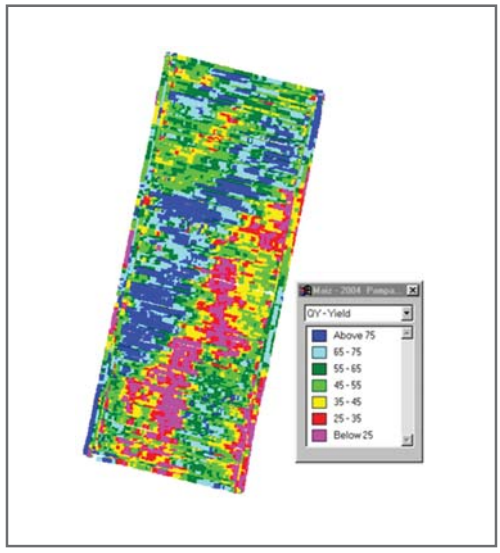


Figura 3.4: Mapa de rendimiento de un cultivo de maíz

Los tipos de variabilidad que pueden presentarse son: variabilidad natural e inducida. Es natural cuando depende del clima, el suelo (génesis del suelo y propiedades físicas y químicas), o del relieve, etc., mientras que la variabilidad inducida se refiere al manejo (historia del lote, insumos agregados, prácticas culturales, etc.).

Conociendo la variabilidad existente en los lotes y debido al grado de avance tecnológico alcanzado por algunos productores es que no se puede seguir analizando datos de rendimientos promedios de los campos, desperdiciando al menos 800 datos por hectárea que brinda el monitor de rendimiento (datos puntuales). Los datos provistos por el monitor de rendimiento, más GPS, conforman un mapa que permite conocer los rendimientos del cultivo en cada parte del lote y los factores que intervienen en la expresión del rendimiento, dado que se puede

ir a cada zona del campo mapeado. Luego con un GPS se puede corroborar a qué se debió el mayor o menor rendimiento de los cultivos.

Cosechar datos de rendimiento no insume más pasadas sobre el lote, ni maquinaria específica, sólo una inversión inicial en equipamiento de la cosechadora. No es necesario comprar un equipo (monitor de rendimiento, GPS, software, más todo lo referido a capacitación de los operarios y usuarios) para aprovechar las ventajas de esta tecnología, sólo hay que buscar, contratar y valorar a los prestadores de servicio con equipos de cosecha con monitor de rendimiento y GPS.

Realización del mapa de rendimiento

Los pasos necesarios para lograr el mapa de rendimiento son los siguientes:

1. Una vez lograda la calibración del monitor, hay que corroborar que los datos de GPS se estén guardando en la tarjeta de almacenaje;
2. Se cosecha el área deseada y se extrae la tarjeta del monitor para bajar los datos en una computadora;
3. Se confecciona el mapa en algún programa que permita manejar datos georeferenciados que salgan de los monitores de rendimiento.

Calidad de granos en tiempo real

Existen sensores que en tiempo real y por medio de muestras que van tomando de la noria de grano limpio, cada 12 segundos logran conocer el porcentaje de grasa, aceite, humedad y proteína del grano. Con esta información es posible realizar mapas de calidad que facilitan el almacenaje de los granos separados según calidad.

Calibración de los monitores de rendimiento

Los tipos de calibración requeridos varían según el tipo de monitor. De cualquier modo, el rendimiento no se mide directamente. En lugar de eso, mediciones de fuerza, desplazamiento, volumen, velocidad del flujo de material, contenido de humedad del grano, velocidad de cosecha y ancho de labor se combinan para producir una estimación de rendimiento de cultivo. El rendimiento del cultivo es un valor derivado o calculado. La calibración es ejecutada para asegurar que el dato del sensor y datos ingresados se usan apropiadamente por el monitor para producir el dato final en unidades de rendimiento por hectárea. Antes de comenzar a cosechar con el monitor, este se debe calibrar correctamente para que los datos entregados y grabados sean precisos y confiables.

La calibración comprende la selección de constantes y procedimientos para determinar coeficientes y convertir las señales eléctricas medidas en parámetros deseados.

Calibraciones previas a la cosecha

- Calibración por vibración (hay que controlarla cada vez que se repare o modifique la máquina pero básicamente es una vez por campaña).
- Calibración de distancia (cuando se cambia el rodado o bien cuando las condiciones de piso de cosecha cambian bruscamente, pero por lo general es una vez en la campaña).

Calibraciones durante la cosecha

- Calibración del sensor de altura del cabezal (cada vez que se cambia de cultivo).
- Calibración de humedad de grano. Se debe comparar la medida determinada por el monitor de rendimiento con respecto a determinaciones de otro medidor externo de humedad cuyas medidas hayan sido verificadas en su precisión. Se controla cuando varía mucho la humedad del grano.
- Calibración del peso del grano. Antes de realizar esta operación se debe realizar la calibración de humedad. El monitor se calibra sobre la base de pesos actuales que se le ingresan, estos se obtienen pesando una cierta cantidad de grano cosechado y se compara con una balanza precisa. Para realizar la calibración de peso son de suma utilidad las tolvas autodescargables con balanza electrónica, de esta manera se independiza de la existencia de una báscula cercana al lugar de cosecha. Esta calibración se realiza para cada cultivo independientemente y debe repetirse cuando se note que la precisión haya excedido el 5% del error comparado con las básculas.

Si todos estos pasos son realizados correctamente, se obtendrá un nivel de precisión del rendimiento corregido por humedad menor al 2%, lo que ubica a los datos obtenidos como muy útiles para ser utilizados en el diagnóstico de todo el lote. Se considera aceptable una precisión del monitor de hasta el 5%. Esta calibración debe realizarse cada vez que se cambia de cultivo, cuando el cultivo varía mucho en la humedad del grano (sale de lo normal, o está por arriba del 20 a 25%).

Existen diferentes marcas y modelos de monitores de rendimiento, y entre los mismos varían los sistemas de medición de flujo, la forma y lugar de medir la humedad, la interfase con el operador en la consola, la manera de calibrar, etc., pero los principios y el objetivo son coincidentes para todas las opciones del mercado.

Diferencias de calibración de peso entre diferentes tipos de monitores de rendimiento

Hay dos maneras de calibrar el peso:

1. Ingresando el peso real (indicado por una balanza externa);
2. Ingresando un factor de corrección (obtenido de la diferencia entre el peso que indica el monitor de rendimiento y el peso de la balanza externa).

Los monitores de Ag Leader (Ag Leader 2000, PF 3000, PF Advantage e Insight) y los AFS de CASE / New Holland se calibran con pesadas sucesivas. A mayor cantidad de cargas mayor es la precisión en el pesaje a diferentes flujos (cinco cargas a diferentes flujos sería el óptimo para obtener una curva de calibración). Con una sola pesada se podría calibrar pero en rendimientos extremos quedaría con un error mayor.

Los monitores Green Star de John Deere y Field Star de ACGO / Massey Ferguson se calibran ingresándoles un factor de corrección. Son simples de calibrar debido a que con una sola pesada se obtiene el factor de corrección y una vez ingresado ese factor, traza una curva de calibración estimada en base a ese punto único (en los extremos de rendimiento suele incrementar el porcentaje de error). Las cosechadoras serie 60 de John Deere poseen un monitor de rendimiento que tiene la posibilidad de ingresar dos factores, uno para la zona de alto rendimiento y uno para los de bajo rendimiento, lo que ayudaría a tenerlo mejor calibrado para ambos flujos y disminuir el error en los extremos. Se puede destacar la gran evolución lograda con los monitores Field Star de AGCO / Massey Ferguson en lo que respecta al tipo de pantalla activa que poseen, la

información que brindan respecto al funcionamiento de la máquina y a su utilización para la aplicación de dosis variable.

Por ejemplo, en la mayoría de los monitores –excepto en John Deere y AGCO (que modifica solamente el último lote)–, la calibración es retroactiva o sea que modifica los valores de rendimiento anteriores y sino se tuvo la precaución de bajar la tarjeta con los mapas ya realizados (en lotes anteriores) se pueden modificar los valores de rendimiento.

Para que estos monitores puedan hacer el mapa de rendimiento deben estar conectados a un GPS. Lo que se pude observar, es que si bien la mayoría de los monitores de rendimiento ya pueden funcionar con un GPS de mano sin señal correctora, hay algunos como la última versión de monitores AFS de CASE que no admiten señal satelital sin corrección, por lo que no pueden funcionar con GPS autónomos (de mano).

Control de pérdidas con monitor de rendimiento por medio del flujo de granos (t/h)

Las cosechadoras poseen un nivel de eficiencia de trabajo (trilla, separación y limpieza) en cada cultivo que depende directamente de la capacidad de alimentación (t/h) y procesado de grano. Si el operario toma la precaución de evaluar ese límite de capacidad de procesamiento de la cosechadora (t/h/niveles de pérdida para el cultivo cosechado), puede regular la velocidad de trabajo mediante el uso del monitor de rendimiento. Con esa información el operario podría avanzar más rápido en los lugares de menor rendimiento del cultivo y más lento en los lugares de mayor rendimiento, manteniendo constante el flujo de alimentación de grano, de acuerdo a la capacidad ideal de la cosechadora.

El sensor de humedad también puede usarse para evitar problemas puntuales de humedad del grano durante el almacenaje, ejemplo maíz en bolsa con 16% de humedad máxima. Si por error o falta de información una tolva de maíz supera el 19% de humedad debido a que algún lugar del lote está más verde el cultivo o que se está cosechando a horarios inapropiados, se puede arruinar toda una partida. Con este sensor, monitor y una estrategia de comunicación podemos estar evitando estos problemas en el almacenaje de granos.

Descripción del monitor de rendimiento Ag Leader Insight

La firma Ag Leader de EE.UU., cuenta con un modelo de monitor de rendimiento denominado Insight, de pantalla activa de 10,4 pulgadas (**Figura 3.5**), que puede realizar el mapa de rendimiento en colores y en tiempo real. Sumado a esto, tiene la opción de además superponer capas de información en la misma pantalla del monitor, como por ejemplo, tener un mapa de variedades o híbridos de fondo sobre el cual se va desplegando el mapa de rendimiento a medida que se cosecha el lote.

Figura 3.5: Pantalla del nuevo monitor Insight de AgLeader, mostrando la confección de un mapa de rendimiento en colores en tiempo real, superpuesto a un mapa de híbridos de Maíz.

La importancia de esta característica es que el productor que está cosechando sus lotes, pueda observar en el momento la variabilidad que manifiesta el rendimiento del cultivo y realizar

de manera simultánea observaciones y anotaciones de lo que se identifica a campo. Es decir, desentrañar un paso más las diversas causas y combinaciones, responsables de la variabilidad de rendimiento de un lote.

Este monitor también presenta la tecnología de cableado Can bus, a veces llamada también cable inteligente, que a través de un sólo cable comunica a todos los sensores del monitor, cada uno de los cuales envía su información con un identificador del tipo de dato. Además, cada sensor es responsable de parte del procesamiento de la información que genera, liberando capacidad de la consola para otras funciones. La ventaja de este sistema es la mayor simplicidad de cableado e instalación y de mayor importancia aún, la posibilidad de agregar sensores sin la necesidad de agregar cableado ni reprogramaciones complejas de la consola.

POTENCIALIDAD DE LOS MONITORES DE RENDIMIENTO EN LA COSECHA DE ENSAYOS Y EN LOTES DE PRODUCCIÓN

El monitor de rendimiento en sí, es una herramienta independiente de las de la agricultura de precisión, dado que no necesita entrar en un sistema donde el único objetivo sea la aplicación de la dosis variable de insumos. Numerosos investigadores utilizan al monitor para conocer el rendimiento de diferentes híbridos, variedades, dosis de fertilización, diferencias de rendimiento por distintas velocidades de siembra, localización del fertilizante, diversas fuentes de fertilización, distintos espaciamientos entre surcos en soja, tratamientos de fungicidas para roya de soja o bien, diferente grado de incidencia de plagas y enfermedades. Todas estas virtudes las brinda el sólo hecho de poseer un monitor de rendimiento en una cosechadora.

Por otra parte, si el objetivo es conocer la variabilidad de los lotes que se trabajan y se aspira a manejarlo sembrando y fertilizando específicamente según la potencialidad de los ambientes, entonces el monitor pasa a ser un delimitador de zonas, donde podemos conocer, además del área que ocupa una zona, su rendimiento real para cada cultivo, año en particular, etc., y con esta información empezar a correlacionar al rendimiento con características físicas y químicas del suelo, o con distintos manejos anteriores, como rotaciones, fertilizaciones, etc.

A modo de ejemplo, mostraremos resultados de un ensayo de soja realizado con sembradora dividida que muestra la potencialidad del monitor de rendimiento para analizar los datos en una computadora posteriormente a la cosecha, teniendo como variable el distanciamiento entre hileras y el relieve del lote (loma y bajo).

Se sembró el 18 de Diciembre del 2000 la variedad Don Mario 4800 RR (grupo 4.5 indeterminada) en la localidad de Manfredi, Córdoba, Argentina. El clima es semiárido y presenta un perfil de suelo A – AC – C (Haplustol típico). La siembra se realizó cruzando dos sitios o ambientes (loma y bajo), la densidad de siembra fue de 350.000 plantas/ha y se probaron dos espaciamientos entre hileras (26 cm y 52 cm). El antecesor fue trigo con un rendimiento promedio de 2.560 kg/ha.

La metodología utilizada es de sembradora dividida que consiste en que la mitad de la sembradora está a 26 cm, dado que se incorporan cuerpos fertilizadores que siembran soja a chorrillo, y la otra mitad lo hace a 52 cm, como lo es originalmente la sembradora MEGA de Agrometal (**Figura 3.6**). El ensayo consistió en seis repeticiones una al lado de la otra, ya que cuando la sembradora va y viene quedan ambas mitades juntas, como si hubiera pasado una sembradora a 26 y la otra a 52 cm. Esto hace que en la cosecha se tome la precaución de cosechar el ancho de cada uno de los diferentes distanciamientos de hilera.

Figura 3.6: Vista de las franjas a 52 y 26 cm del ensayo al momento de cosecha.

Descripción de los tratamientos evaluados con seis repeticiones

Las franjas de 5,2 y 4,2 m fueron cosechadas con monitor de rendimiento con posicionamiento satelital. Cosechadora John Deere 1175 con monitor de rendimiento Ag Leader 2000 (**Figura 3.7**) GPS CSI y señal Beacon.

Todos los tratamientos fueron repetidos seis veces, o sea que los resultados expresados son promedios de seis repeticiones. El ancho del cabezal de la cosechadora fue de 7 m, utilizando solamente un ancho efectivo de 5,2 m y 4,2 m al cosechar las diferentes parcelas que se sembraron apareadas pero que se cosecharon en forma separada. El ancho real de cada parcela fue corregido en el monitor de rendimiento al ingresar a cada una de las parcelas del tratamiento para no afectar el área real de cosecha y por ende el rendimiento.

Figura 3.7: Monitor de rendimiento Ag Leader 2000

El monitor de rendimiento fue calibrado previo a la cosecha del ensayo a diferentes flujos de ingreso de grano, presentando un error de pesada menor al 1% con respecto a una tolva balanza.

Los resultados (**Cuadro 3.2**) muestran que si se toma el promedio de rendimiento de la pasada, se obtiene un valor que presenta diferencias de rendimiento de 450 kg/ha a favor de la siembra a 26 cm, pero si se analizan los diferentes espaciamientos entre hileras se puede observar que la respuesta es más marcada si se toma sitio-específicamente. Esto se explica por lo expuesto en la teoría sobre radiación interceptada y aprovechamiento del agua. Por ejemplo, con estos datos se puede deducir que en la loma la disponibilidad de agua es menor que en el bajo y por ende, el crecimiento vegetativo también es menor en la loma, con lo cual el cultivo tarda más tiempo en

Cuadro 3.2: Resultados promedios, por tratamiento y por zona. Variedad Don Mario 4800 RR (grupo 4,5 indeterminada)

Densidad 350.000 plantas/ha			
Espaciamiento entre hileras	Rendimiento promedio (kg/ha)	Rendimiento en loma (kg/ha)	Rendimiento en bajo (kg/ha)
26 cm	3680	3550	3820
52 cm	3230	2830	3640
Diferencias	450	720	180

cerrar el surco y lograr su Índice de Área Foliar (IAF) crítico. Si se acorta el distanciamiento entre hileras (26 cm) se logra una mejor intercepción de la radiación que promueve un mayor IAF en relación al espaciamiento de 52 cm (**Figuras N° 3.8, 3.9 y 3.10**).

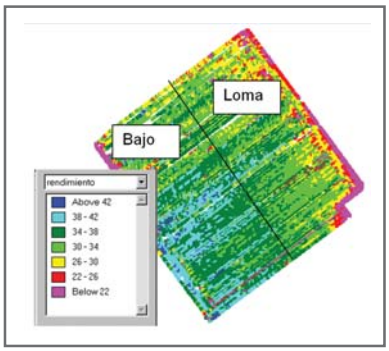


Figura 3.8: Mapa de rendimiento del lote de soja de 2º donde se realizó el ensayo, total 40 ha.

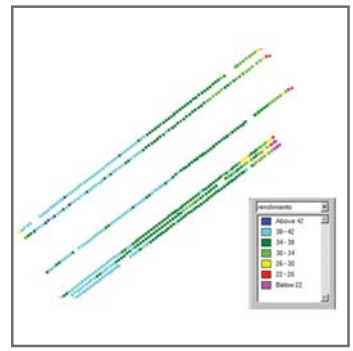


Figura 3.9: Zonas seleccionadas del mapa de rendimiento de las franjas cosechadas a 26 cm de distanciamiento entre hileras.

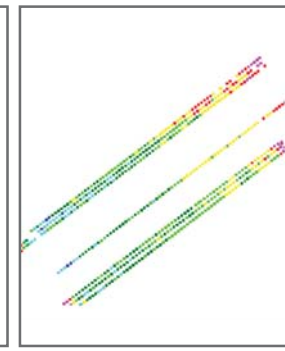


Figura 3.10: Zonas seleccionadas del mapa de rendimiento de las franjas cosechadas a 52 cm de distanciamiento.

Conclusiones del ensayo

Los resultados de este ensayo indican que para las condiciones evaluadas, disminuir el espaciamiento entre hileras de 52,5 cm a 26 cm puede significar un incremento de rendimiento de 720 kg/ha. En el ambiente de alto potencial (bajos) si bien el acortar las hileras para esas condiciones es beneficioso dado que se logró un incremento de 180 kg/ha, puede no resultar económico el cambio de sembradora o su modificación. Este análisis sitio-específico de los resultados enriquece el diagnóstico y contribuye a mejorar la eficiencia de los factores de manejo, porque existen muchos productores que poseen sembradoras de grano fino y grano grueso, con la posibilidad de utilizar ambas en la siembra de soja. Con este tipo de información podría orientarse a la utilización de la sembradora de grano fino en lotes donde predominen ambientes de bajo potencial y las de grano grueso (hileras más amplias) en lotes con ambientes de mayor productividad.

Otro factor a probar en ensayos futuros es la incidencia que puede tener el complejo de enfermedades de fin de ciclo y la roya de la soja que poseen incidencia variable según el follaje del cultivo.

Se pueden mencionar muchos ejemplos de este tipo que son detectados fácilmente con el manejo de la información georeferenciada en soja, como así también en otros cultivos. El productor que conoce los factores limitantes de rendimiento de su campo y diseña la siembra y cosecha de datos en campos de alta variabilidad, se transforma en un productor de precisión.

Como mensaje se puede decir que un equipo de cosecha constituido por cosechadora, acoplado tolva, casilla, camioneta, tractor, en promedio está valuado en 200.000 dólares y sólo permite cosechar el grano, mientras que el mismo, equipado con monitor de rendimiento, GPS y programa cuesta aproximadamente 208.000 dólares, lo que habilita a cosechar granos y datos de rendimiento geoposicionados, incrementando el valor del equipo en un 4%. Toda la cosecha de la próxima campaña que se realice sin monitor de rendimiento, será información perdida que nunca más se podrá recuperar.

3.2. VITIVINICULTURA Y FRUTICULTURA

Stanley Best; Lorenzo León y Marcelino Claret
sbest@inia.cl; lleon@inia.cl y mclaret@inia.cl
Instituto de Investigaciones Agropecuaria (INIA), Chile

3.2.1. VITICULTURA DE PRECISIÓN: UNA NUEVA Y PODEROSA VÍA TECNOLÓGICA HACIA LA PRODUCCIÓN DE VINOS DE ALTA CALIDAD

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la agricultura requiere urgentes transformaciones en cuanto las tecnologías aplicadas, en orden a aumentar la eficiencia productiva, la calidad del producto obtenido y, en último término, la rentabilidad percibida por la empresa. En este sentido, se han incorporado en la agricultura grupos de tecnologías que hasta hace algunos años eran empleados con fines de investigación y manejo en áreas muy distintas a la agrícola. Dentro de estas, se encuentran tecnologías que permiten determinar a distancia diversas características de una determinada superficie (como por ejemplo tierra, agua, vegetación, etc.), proceso que es denominado como "***percepción remota***". Estas determinaciones se realizan mediante equipamiento montado en aviones o satélites, permitiendo obtener imágenes especializadas para distintos fines, y que, como será mostrado en el presente artículo, poseen una enorme aplicabilidad al ámbito agrícola en general, y vitivinícola en particular. Por otra parte, existe otro importante conjunto de tecnologías que actúan en complementación a la percepción remota. Estas corresponden a los llamados "***Sistemas de Información Geográfica***" o SIG, los cuales son empleados para la administración de la información territorial, en donde, se emplean, entre otras tecnologías, sofisticados sistemas de posicionamiento global, en conjunto a programas computacionales especializados. Por último, están las herramientas de análisis estadístico especialmente desarrolladas para este tipo de aplicaciones, tema tratado en el capítulo 8 "Análisis de Datos".

Lo anterior ha permitido que diversos diagnósticos y actividades propias de la agricultura sean manejados con precisiones nunca antes logradas. De esta forma, surge el concepto de "Agricultura de Precisión" y "Manejo de Sitio Específico", término que ha derivado en el uso de "**Viticultura de precisión**" en el caso de los viñedos. El Manejo Sitio-Específico, o Agricultura de Precisión, ha tenido un desarrollo espectacular en los últimos años, especialmente en Estados Unidos y Australia. Internacionalmente, la agricultura de precisión ha sido definida como "optimización de la calidad y cantidad de un producto agrícola minimizando el costo a través del uso de tecnologías más eficientes para reducir la variabilidad de un proceso específico en forma ambientalmente limpia".

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES

Hasta hace muy poco, los profesionales y productores vitivinícolas no poseían las herramientas para caracterizar, y representar en un mapa, la variabilidad espacial de las propiedades del viñedo, esto es, en cuanto a características del suelo (profundidad, retención de humedad, contenido de

nutrientes, acidez, etc.) y de la planta (cantidad de m^2 de hojas por m^2 de suelo [o índice de área foliar], relación hojas frutos, entre otras). El contar con información de este tipo aumenta enormemente el conocimiento de los factores condicionantes del rendimiento y la calidad de la producción en un viñedo, en relación al conocimiento tradicional en torno a promedios generales que, en los mejores casos llegaban a nivel de cuartel. De esta manera, las tecnologías asociadas al manejo sitio específico conducen al diagnóstico de las propiedades del suelo y caracterización del rendimiento y calidad del viñedo, con la consiguiente aplicación variable de insumos en sectores homogéneos y cosechas diferenciadas. Lo anterior, con el fin de obtener aumentos substanciales en la eficiencia de dichos insumos y en el rendimiento y calidad de la uva a vinificar.

En la viticultura de precisión, la selección de sub áreas de calidad de uvas uniforme en un determinado viñedo se puede determinar a través del uso de un tipo particular de imágenes aéreas, denominadas "imágenes multiespectrales", lo cual involucra el uso de cámaras especializadas en la captura de las mismas, así como las técnicas utilizadas en SIG. Luego de ser capturada, la imagen es sometida a diversos análisis con lo que es posible obtener los denominados "índices de vigor vegetativo", entre los que se encuentra el índice "NDVI" (siglas en inglés: Índice de Vegetación Diferencial Normalizado). La importancia de tener una adecuada representación del vigor vegetativo en el viñedo se fundamenta, en que esta corresponde a una variable altamente asociada a la calidad de la uva a ser vinificada. Estos índices vegetacionales son representados finalmente en "planos de vigor" para distintos sectores en un determinado viñedo (**Figura 3.11**).

La selección de dichas áreas de calidad uniforme (en este caso a través de la obtención del NDVI) difícilmente pueda ser determinada mediante métodos tradicionales basados en muestreos en terreno para cualquiera de las variables que influyen sobre la producción y calidad de la uva obtenida en los viñedos. Lo anterior se da por los elevados costos que tiene el realizar un muestreo con un adecuado número de puntos, que sea capaz de representar la variabilidad presente en los cuarteles de los viñedos. Al no hacerse habitualmente, se generan grandes errores de interpretación, ya que el nivel de muestreo no es localizado según la variabilidad del cuartel. Por su parte, el uso de índices vegetacionales derivados de las imágenes capturadas desde tomas aéreas goza de una gran precisión en las determinaciones realizadas y de una adecuada representatividad espacial de la variabilidad en el viñedo, permitiendo una localización de los puntos muestreales representativos y muchas veces menor al que actualmente se utiliza y con mejores resultados. Además de esto, a través del seguimiento del comportamiento de los índices vegetacionales, por distintas tomas realizadas en una misma temporada y entre temporadas, permite realizar un seguimiento en el tiempo, con lo cual el método permite un seguimiento preciso "espacial-temporal" de la condición del viñedo. Es importante destacar, que el empleo de esta tecnología requiere la obtención de

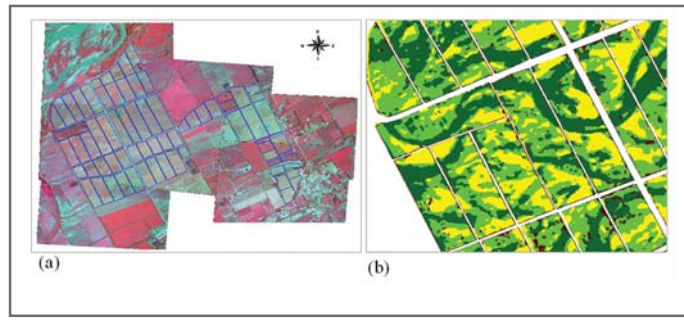


Figura 3.11: (a) Imagen multiespectral corregida de un viñedo y dispuestas en un mosaico. (b) Visualización de la clasificación de índice vegetacional NDVI.

información específica de terreno del viñedo donde son obtenidas las imágenes multiespectrales. Esto es, para lograr una adecuada utilidad de las mismas, evitando así diversas fallas de interpretación de las imágenes.

La viticultura de precisión se ha utilizado a escala comercial en países competidores como Australia y EE.UU. a partir de mediados de la década pasada. Las primeras experiencias se centraron en la detección de Philoxera en EE.UU. (Napa Valley), prosiguiendo en la temporada de 1998 con aplicaciones en torno a la temática de calidad. Algunos ejemplos de estas experiencias han sido el proyecto "Vintage", en EE.UU. (http://geo.arc.nasa.gov/sge/vintage/vintage.html) y el servicio "Terraspase" (http://www.terraspase.com/vinimage.htm). En importantes entidades, tales como el consorcio CRCV en Australia, se ha dado una gran importancia a la incorporación de esta tecnología a través de una creciente asignación de recursos a centros de investigación como el "Australian Centre for Precision Agriculture" (http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa/) y de asesoría en esta área (http://www.provisor.com.au/).

PROYECTO MANEJO SITIO ESPECÍFICO: PRIMERA EXPERIENCIA EN CHILE

Hasta 2001, no existían precedentes en el uso esta tecnología en el rubro vitivinícola nacional chileno, a pesar del creciente interés mostrado por parte de diversas empresas nacionales que habían tenido la oportunidad de conocer estas aplicaciones en el extranjero. Es en este momento cuando se incorpora el proyecto FIA-INIA "Desarrollo de la tecnología de manejo sitio específico en viñedos para mejorar la calidad de la uva a vinificar", cuyo objetivo general ha sido el incorporar la tecnología de agricultura de precisión a la industria vitivinícola chilena, a través de una investigación que ha estudiado la optimización de los aspectos metodológicos a ser empleados y los principales factores que influyen sobre la variación en la calidad y rendimiento de la producción bajo nuestras condiciones.

Por otra parte, la contingencia de este proyecto ha quedado de manifiesto, entre otras razones, al existir una marcada tendencia de los países competidores a no transferir completamente a Chile estas tecnologías por el alto valor que le asignan las empresas privadas asociadas a los centros de investigación tecnológicos y universitarios. Es por esto, que el proyecto ha tenido un alto valor estratégico para el sector vitivinícola chileno, ya que la utilización de esta herramienta constituye una innovación tecnológica de punta que permite a Chile aprovechar desde sus inicios las ventajas que ya han estado percibiendo los países competidores, en la obtención de uvas destinadas a la producción de vinos de alta calidad.

Resultados e impacto

A través del proyecto antes mencionado, ha quedado de manifiesto que la obtención de un mapa que muestre la variabilidad del vigor vegetativo es de gran utilidad para el manejo agronómico del viñedo, a ello se suma, la comprobación de los factores que influyen en mayor medida sobre esta variabilidad y cuales son los lineamientos más relevantes a corregir, separar o estandarizar sobre cada sector o sitio. Así, por ejemplo, los resultados de esta investigación han manifestado que la relación entre el área foliar (m^2 hojas/m hilera) con respecto a los valores de NDVI poseen una alta correlación, con valores de R^2 de 0,8 para Cabernet Sauvignon y Chardonnay. Por otra parte, se ha determinado que los valores de NDVI están significativamente asociados a la información monitoreada de rendimiento y calidad de uvas, encontrándose altas relaciones con rendimiento (R^2=0,7), °Brix , (R^2=0,8) y Acidez Total (R^2=0,6). De igual forma, se obtuvieron altas correlaciones en la calidad química de la uva y las áreas de vigor, en cuanto a niveles de fenoles, antocianinas y características organolépticas (degustaciones).

De esta manera, los valores de NDVI, tal como se afirma en la literatura internacional, tienen una alta correlación con la información de rendimiento y calidad de las uvas, teniendo esta variable un carácter integrador para la sectorización de áreas de rendimientos y calidades.

En virtud de la medición de variables de planta en terreno, se ha podido establecer que uno de los factores más importantes que influye sobre la variabilidad presentada por el viñedo corresponde al estatus hídrico de la plantas. Estas determinaciones se han establecido mediante el estudio de potencial hídrico xilemático a mediodía y su asociación a los distintos sectores de vigor.

Por otra parte, producto de la información de rendimiento y área foliar se han podido desarrollar los planos de equilibrio entre área foliar (m^2 hojas) y el rendimiento por planta (kg uva/ planta) para los cuarteles en estudio. Para llegar a estas estimaciones, se han debido realizar las correspondientes mediciones en terreno para obtener finalmente las correlaciones, las cuales han incluido mediciones de área foliar, conteo de racimos y cosechas diferenciadas según sectores. Además, sobre dichos planos realizados, se incorporó la información de calidad de vino, la cual fue producida a partir de una mesa de cata enológica, estableciéndose en un "excelente" el ajuste de las áreas de equilibrio en relación con las calidades de los vinos.

El avance obtenido por el proyecto ha resultado promisorio en la resolución de las hipótesis planteadas y en los resultados obtenidos, con importantes mejoras en las estimaciones desarrolladas.

PROGAP - INIA CHILE

Dados los buenos resultados de las investigaciones desarrolladas y el interés mostrado por diversas empresas privadas, se ha creado el Programa de Agricultura de Precisión del INIA Chile (PROGAP - www.progapinia.cl), a través de su Centro Regional de Investigación Quilamapu, Chillán, con colaboración de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Concepción (Chile). La creación de este programa se orientó hacia la investigación y el empleo de la agricultura de precisión en diversos rubros productivos, entre los que destaca el vitivinícola, pomáceas, carozos, paltos y frutales menores. En este sentido, se encuentran en actual desarrollo distintos proyectos que cubren cada uno de estos rubros, integrando a otras entidades de Investigación como lo es la Universidad de Talca (Frutales). Con esto, el trabajo del Programa de Agricultura de Precisión del INIA Chile, ha dado pie a la evaluación de los estudios antes mencionados bajo diferentes condiciones, variedades y especies, con lo que ha aumentado la confianza por parte de los productores ante la metodología propuesta.

Por otra parte, INIA Chile, desarrolla actividades de intercambio de experiencias con centros de agricultura de precisión de distintos países, en donde estas metodologías han sido implementadas antes que en Chile. En este contexto, se puede destacar un Seminario Internacional, desarrollado durante Septiembre de 2004, y en donde se dieron a conocer las experiencias nacionales extranjeras, y en donde se pudo observar el excelente nivel del estado actual de la agricultura de precisión en Chile, en relación a importantes precedentes extranjeros, tales como el proyecto Vintage en EE.UU.

INCORPORACIÓN DEL VIÑEDO AL SISTEMA DE AGRICULTURA PRECISIÓN

El incorporar el esquema de agricultura de precisión a un viñedo específico y utilizarlo como parte del sistema de manejo del mismo, significa seguir varios pasos en los que se incorporan cada uno de los elementos tecnológicos que permiten realizar un análisis adecuado del estado del viñedo, que corresponden a:

(i) Obtención de un SIG del área del viñedo;

(ii) Ubicación geográfica de los centrales. Este método ha sido incorporado por ser los centrales puntos de referencia bien establecidos y que pueden ser ubicados fácilmente por el personal en terreno, facilitando considerablemente las labores. Esto no ocurre así con el uso de puntos de referencia derivados a partir del empleo de GPS, ya que en muchos casos se puede caer en ineficiencias operativas y poca seguridad en la identificación de los puntos de interés;

(iii) Identificación de zonas homogéneas, mediante la captura de imágenes multiespectrales y la posterior obtención de índices de vigor (NDVI) y de planos de vigor;

(iv) Sectorizaciones sobre la base de tipos de vinos requeridos u orientación comercial de la empresa;

(v) Detección de problemas y potenciales soluciones según lo requerido;

(vi) Monitoreos regulares en terreno de variables de interés, los cuales estarán en concordancia con los análisis de sectorización y detección de problemas ya mencionados;

(vii) Determinación de cambios temporales y ajustes, observando variables tales como condiciones climáticas. El considerar lo anterior, es de gran importancia al poder reducir errores en el tiempo;

(viii) Los pasos anteriores en el ámbito de manejo se deben finalmente integrar al sistema de gestión del viñedo. Actualmente en nuestro país ya hay más de cinco empresas que entregan asesorías en esta área.

Los costos por hectárea de la realización de un manejo sitio específico, considerando el actual estado del arte del conocimiento y los servicios ofrecidos, varía entre 15 a 25 USD/ha (dependiendo de lo solicitado), lo cual resulta claramente compensado por las ventajas otorgadas por el sistema.

NUEVOS DESAFÍOS Y BENEFICIOS

Según los resultados obtenidos en las investigaciones sobre el estado actual de la tecnología de la viticultura de precisión y las necesidades crecientes por parte de las empresas, se pueden destacar varios desafíos para las futuras temporadas, entre otros:

(i) Optimización en el diagnóstico espacio - temporal del estado hídrico del viñedo, al representar el principal componente identificado en la variabilidad de las características de las plantas en nuestros viñedos. Para esto, actualmente se trabaja para la implementación de tecnologías de percepción remota en esta área;

(ii) Desarrollo de un sistema de pronóstico de rendimiento temprano;

(iii) Incrementar las herramientas de integración de manejo a los sistemas de gestión, para encontrar los mejores equilibrios técnico - económicos en la aplicación de la tecnología de manejo sitio - específico. Esto permite la evaluación económica (costos-beneficios) por zonas en el viñedo para mejorar la distribución de recursos;

(iv) En cuanto a otros beneficios potenciales están asociados como disminución en la carga de pesticidas aplicados, lo cual lleva a una mayor seguridad en cuanto a la inocuidad de la uva para vinificación;

(v) La viticultura de precisión es una herramienta que se ajusta muy bien a los requerimientos internacionales de exportación, al poder incorporar con gran eficiencia elementos tales como la trazabilidad del producto comercializado; y

(vi) Herramienta muy poderosa para marketing de la empresa.

CONCLUSIONES

A continuación se detalla un resumen de los beneficios derivados de la aplicación de la viticultura de precisión al esquema productivo y de gestión de un viñedo. La viticultura de precisión permite:

(i) Realizar cosechas diferenciadas según el potencial de calidad de las uvas o su grado de madurez;

(ii) Dirigir labores tales como poda, manejo de follaje, riego, etc., según las distintas áreas de vigor;

(iii) Perfeccionar el monitoreo y sus resultados produciendo ahorros en cantidad de mano de obra requerida;

(iv) Tomar decisiones en base a información precisa y oportuna, reduciendo el riesgo de errores en las decisiones; y

(v) Generar análisis espacio - temporales para un mejor entendimiento de los problemas productivos locales.

3.2.2. FRUTICULTURA DE PRECISIÓN: EL FUTURO CERCANO DEL MANEJO Y PRODUCCIÓN FRUTÍCOLA DE EXPORTACIÓN

Los datos sobre la evolución del consumo agroalimentario de frutas, en general, indican un constante crecimiento en la última década, sin embargo, existen pocos estudios de predicción sobre el desarrollo futuro del mercado frutícola. Al analizar el crecimiento a nivel mundial del consumo de fruta fresca en la última década, en su aspecto comercial y estratégico, el crecimiento se proyecta con una tasa de 3,6% (FAO, 2004). Desde el punto de vista estratégico, el diagnóstico dice que el empresario ha tendido a una visión del negocio como tal, más que a una visión de planificación a futuro. Teniendo en cuenta lo antes mencionado, y visualizando que los mercados internacionales tienen cada vez mayores estándares de calidad y sanidad, los países en vías de desarrollo debemos plantearnos la necesidad de hacer frente al cumplimiento de dichas exigencias en forma eficiente y efectiva. Sin embargo, generalmente no se cuenta con las herramientas necesarias para enfrentar este problema, o aún peor, no se ha tomado conciencia de ellas y sus implicancias a mediano plazo. A lo anterior, se agrega la alta competencia internacional, que reduce paulatinamente el mercado objetivo o sencillamente se pierde el mercado, lo que obliga indiscutiblemente a cumplir con las normas impuestas para nuestra fruta de exportación.

A pesar de que el negocio frutícola ha sido rentable a través del tiempo, en los últimos años los márgenes han ido disminuyendo. El proceso de globalización abrió la posibilidad de acceder a mercados distintos a causa de los tratados de libre comercio pero, consecuentemente, las exigencias y normas aumentaron. Si bien los acuerdos de libre comercio implican una amenaza, también son una oportunidad, siempre que utilicemos la tecnología para competir de igual a igual con los países más desarrollados, pudiendo ofrecer productos de calidad, sanos, trazables y con una protección del medio ambiente. Sin embargo, el sólo cumplimiento de dichas exigencias no será suficiente como para diferenciarse con el resto de nuestros competidores internacionales, sino más bien debe existir una visión de un país tecnológico que permita solventar su credibilidad.

Un camino a seguir para afrontar este dilema, es la utilización de modernas tecnologías que nos permitan capturar, manejar y analizar información de calidad para tener una gestión técnica - económica más eficiente de los predios, evitando el manejo agronómico al que actualmente se someten los huertos que tienden a ser homogéneos y sobre la base de recetas, considerando que los factores productivos (suelo, agua, nutrientes, microrelieve, etc.) poseen una distribución regular, ya que no se dispone de herramientas de bajo costo que permitan la obtención de la información necesaria que detalle estas variaciones. Lo anterior hace que la variabilidad de los frutales siempre esté presente y los intentos para disminuirlas no sean significativos. Todos los esfuerzos que actualmente se han realizado en modernizar los huertos, apuntan al cumplimiento de las normas internacionales, sin embargo, la información generada en el proceso no está siendo útil para obtener mejor calidad y rendimientos, ya que la información es dispersa –es sólo un dato y no información que sirva como guía de acción en el manejo del huerto.

La organización e incorporación de toda la información anteriormente descrita, en un sistema digital, permite el posterior análisis de la misma. Sin embargo, ésta por sí sola no permite identificar la variabilidad espacial de calidades, rendimientos y factores productivos si no se incorpora el aspecto espacial (geográfico) y temporal (evolución) de los mismos, siendo estos últimos los que realmente permiten sectorizar los problemas. Al respecto, las empresas han tratado de identificar variaciones espaciotemporales con metodologías muy rudimentarias y de alto costo, las cuales no han obtenido buenos resultados, por lo engorroso y el tiempo de captura que implica el obtenerlos, agregando que no se ha podido establecer un criterio estándar que sea aplicable.

Para responder a lo anterior, el Programa de Agricultura de Precisión de INIA Chile, en conjunto con otras instituciones como la Universidad de Concepción y la de Talca, mediante el proyecto de Fruticultura de Precisión, han introducido una nueva tecnología, la cual consiste en obtener planos de NDVI (a partir de imágenes multiespectrales) oportunamente para identificar y magnificar las diferencias en los huertos y asociar estas diferencias a las causales en terreno. Paso siguiente, se pretende tomar acciones cuantificables para corregir o disminuir la variabilidad, obtener registros temporales y lograr gestionar el huerto de forma integrada en un sistema digital.

Los índices vegetacionales se obtienen por medio de la división entre bandas espectrales obtenidas de imágenes multiespectrales. Uno de estos índices es el NDVI que se asocia al vigor de los árboles, permitiéndonos obtener un índice que diferencia las expresiones de vigor de los frutales, área foliar y sanidad vegetacional, entre otros factores que evidencian la variabilidad de vigor, donde se pueden incluir cualquier factor que esté afectando y diferenciando el crecimiento vegetativo.

El estado actual del proyecto permite tener una evaluación objetiva de la variabilidad del rendimiento y calidad de los huertos tanto de manzanos como duraznos, tal como fue planificado en la propuesta. Así, los resultados actuales, tanto de evaluaciones en el rendimiento como de calidad de los huertos integrados en el proyecto, han demostrado que existe una variabilidad extremadamente alta y permite concluir, siguiendo el patrón tradicional de monitoreo, que se requeriría una alta densidad de muestreo para lograr detectar los patrones de variabilidad necesarios para un buen monitoreo de factores productivos, factor impracticable y antieconómico. Sobre esta base, se buscaron correlaciones con variables de rendimiento y calidad en relación a los planos de NDVI (**Figura 3.12**) obtenidos a partir de la información de las imágenes multiespectrales (**Figura 3.13**). Las correlaciones obtenidas con los primeros análisis son bien definidas y permiten establecer conclusiones iniciales, permitiendo recomendar estaciones de monitoreo más efectivas y de menor costo, factor indispensable para el éxito de esta metodología al nivel de productores.

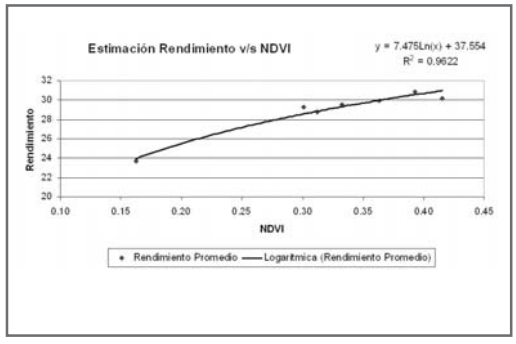


Figura 3.12: Relación entre los promedios de NDVI y el rendimiento real.

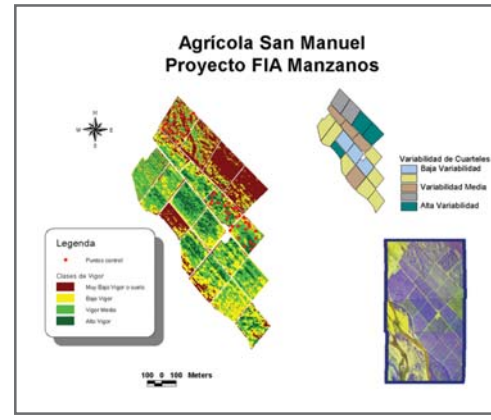


Figura 3.13: Localización de puntos de monitoreo de rendimiento y calidad, en cuarteles de Manzanos, variedades Gala (A), Galaxy (B) y Pink Lady (C). Fundo San Manuel, Curico, Chile.

Para medir la calidad de los frutos (ºBrix, calibre, presión de frutos, etc.) se usaron los instrumentos tradicionales utilizados en los huertos frutícolas pero, se está evaluando la posibilidad de usar y evaluar nuevas tecnologías de monitoreo, tales como la que se presentan en la **Figura 3.14**, instrumentos que miden ºBrix, calibre, presión de frutos con tan sólo tomar la fruta, quedando la información almacenada en un datalogger.

Por otra parte, el desarrollo de planos de rendimiento espaciales de los huertos, mediante la trazabilidad de los bins (recipientes o contenedores) de cosecha (**Figura 3.14**), nos permitieron evaluar y cuantificar económicamente (**Cuadro 3.3**) esta variabilidad dentro de los huertos, de tal forma de poder tener una mejor visualización de la problemática real.

Figura 3.14: Monitores experimentales de calidad de fruta. Localización espacial de los bins de cosecha en los huertos, mediante uso de lectores de código de barra y localización según cuartel, hilera y árbol.

Cuadro 3.3. Ganancias en manzanos variedad Gala (en Pesos Chilenos)

Niveles de vigor	Superficie (ha)	% / ha	Rendimiento (kg/ha)	Ganancia ($/ha)	Ganancia (%/ha)
Vigor bajo	2,34	47,8	22957	4.785.216	25
Vigor medio	1,91	39	29603	5.873.467	30,6
Vigor alto	0,65	13,2	42104	8.510.222	44,4

Estos resultados indican que es necesario definir una densidad y frecuencia de monitoreo sobre la base de los niveles de vigor (NDVI) que permita detectar la variabilidad espacial de rendimiento y calidad. Sin embargo, este proyecto está en estado inicial y deberá tener más información que

respalde los resultados iniciales, factor central de la discusión de los investigadores en la actualidad. Lo anteriormente planteado, constituye uno de los resultados relevantes y al mismo tiempo un desafío del proyecto, desde el punto de vista de la validación de esta tecnología pionera para el sector frutícola.

La potencialidad de esta metodología radica en que permite gestionar el huerto por medio de la zonificación natural existente y establecer un procedimiento ordenado de labores culturales que mejoren el proceso productivo, permitan cumplir con las exigencias internacionales y posicionar a las empresas a un nivel de competitividad igual o superior que los países desarrollados, aumentando el horizonte de competitividad de la agricultura chilena. Sin embargo, estas tecnologías están en su fase de investigación y desarrollo, tanto en Chile como en el resto del mundo, pero la tendencia mundial va rápidamente a su incorporación en el ámbito productivo-empresarial, no sólo en la fruticultura sino en todo el espectro agrícola.

CAPÍTULO 4

MUESTREO DE SUELOS Y FACTORES LIMITANTES DEL RENDIMIENTO

Álvaro Roel y José Terra
aroel@tyt.inia.org.uy y jterra@inia.org.uy
Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay

INTRODUCCIÓN

Los últimos avances de la tecnología asociados con nuevas estrategias de manejo de suelos y cultivos pueden proveer a los agricultores de ventajas comparativas en los mercados mientras preservan sus recursos naturales y el ambiente. Debido a la compleja combinación de suelos, atributos de terreno y prácticas de manejo presentes en las chacras (lotes), es usual observar una alta variabilidad espacial en las propiedades de los suelos y por lo tanto, de los rendimientos de los cultivos dentro de las mismas. El concepto "agricultura sitio-específica o agricultura de precisión" como ya ha sido definido dentro de este libro, implica el uso de información acerca de la variabilidad presente en las chacras de manera de delinear zonas y prácticas agronómicas adecuadas a las mismas. La base de sistemas más intensivos e inteligentes de manejo de suelos y cultivos –como la agricultura de precisión– reside en la caracterización temporal y espacial de los factores abióticos y bióticos relacionados con la productividad de los cultivos y la preservación de los recursos naturales.

De acuerdo con Plant (2001), existen tres criterios básicos que deben cumplirse para justificar el manejo sitio-específico: a) la existencia de importante variabilidad espacial en factores que influencian la productividad de los cultivos; b) la identificación y cuantificación de las causas de la variabilidad de estos factores; y c) el conocimiento científico-agronómico que permita utilizar la información recolectada para el logro de un beneficio productivo, económico o ambiental.

Un sistema de manejo sitio-específico exitoso será aquel en el que los factores limitantes para una óptima productividad y protección ambiental pueden ser identificados, caracterizados y manejados en las zonas y momentos apropiados (Mulla y Schepers, 1997). La productividad de los cultivos, la disponibilidad de nutrientes y agua en el suelo, entre otros, son controlados por unos pocos procesos clave. La idea medular de la agricultura sitio-específica es, entonces, identificar estos procesos potencialmente limitantes y establecer para cada uno de ellos los indicadores más críticos para su caracterización.

Además del conocimiento de la media y la desviación de una muestra poblacional, en agricultura de precisión es crítico el conocimiento de la estructura y la correlación espacial de la población muestreada. La geoestadística es una rama de la estadística aplicada, que cuantifica la dependencia y estructura espacial de una variable dada y usa esa información para predecir valores de la variable en sitios no muestreados. Estos dos pasos incluyen típicamente lo que se conoce en geoestadística como modelación espacial e interpolación espacial, que serán desarrollados en el capítulo 8 de este libro.

El **Cuadro 4.1** presenta un resumen de la variabilidad típica encontrada en una serie de propiedades del suelo, usualmente relacionadas con la variabilidad productiva en diferentes sistemas agrícolas. Aunque el coeficiente de variación (CV) es un indicador de la variabilidad presente de una propiedad respecto a la media de la población muestreada, el mismo no nos brinda ninguna información de la estructura espacial en la que esta se produce. En la última columna del Cuadro se presenta el rango en el que se produce la variabilidad descrita por el CV, lo que nos brinda una idea de la estructura espacial de la variación. Esta combinación de variación por un lado y estructura de la misma es la que va a determinar las estrategias de muestro a seguir. Este capítulo presenta una serie de procedimientos alternativos para el muestreo de factores potencialmente causantes de la variabilidad productiva.

La variabilidad espacial de suelos y cultivos en las chacras puede ser cuantificada o estimada a través de varias metodologías. Plant (2000), clasifica estos métodos de medición como: discretos (ej.: muestreo de suelos y plantas en grillas), continuos (ej.: monitores de rendimiento, sensores de conductividad eléctrica del suelo) y remotos (ej.: imágenes satelitales).

A los efectos de este capítulo, teniendo presente que la finalidad de este libro es el de servir como guía para aquellos interesados en la aplicación de la agricultura de precisión, dividiremos

al mismo en cuatro tópicos. Los tres primeros tópicos harán referencia a las diferentes metodologías empleadas para cuantificar la variabilidad espacial, las cuales serán agrupadas en (1) mapas de rendimientos; (2) sistemas de muestreos discretos; (3) uso de técnicas avanzadas para determinar muestreos de suelos; y por último, en un tópico aparte desarrollaremos el tema (4) zonas de manejo.

Cuadro 4.1: Características de la variabilidad

Factor	CV (%)	Categorización	Rango (m)
Rendimiento	8 - 29	Bajo - Moderado	70 - 700
Materia orgánica	21 - 41	Moderado - Alto	110 - 250
% Arcilla	16 - 53	Moderado - Alto	20 - 400
% Arena	3 - 37	Bajo - Moderado	5 - 40
pH	2 - 15	Muy Bajo	20 - 260
Nitrógeno	30 - 60	Moderado - Alto	40 - 275
Fósforo	40 - 160	Alto	70 - 260
Potasio	40 - 160	Alto	75 - 430

Adaptado de McBratney & Pringle (1999) y Mulla & McBratney (2002).

MAPAS DE RENDIMIENTO COMO INDICADORES DE MUESTREO DE SUELOS

Los mapas de rendimiento nos permiten apreciar la variabilidad espacial del rendimiento de una chacra, y sus características fueron presentadas en el capítulo anterior. De acuerdo a algunos autores, los mapas de rendimiento son la mejor herramienta para la delineación de zonas de manejo o la delineación de zonas donde muestrear los diferentes factores que afectan la producción, ya que el rendimiento del cultivo es el mejor indicador de la productividad del suelo en las distintas áreas de una chacra. ¿A qué nos referimos con esto? En aquellos casos donde se cuenta con una serie de mapas de rendimiento de una misma chacra, se puede ir observando qué zonas de la misma presentan generalmente comportamientos productivos por encima del promedio y cuáles presentan comportamientos productivos inferiores. De esta manera se puede dirigir el muestreo a estas zonas de los factores que potencialmente se consideran afectan el rendimiento.

Esto que parece muy fácil, en muchos casos puede ser bastante complejo debido a que no siempre es fácil poder distinguir estas zonas de comportamiento productivo contrastantes a lo largo del tiempo. Los cultivos presentan alta variabilidad espacial y temporal (Pocknee et al., 1996; Roel et al., 2004a). Una de las mayores complicaciones aparecen cuando los patrones de variabilidad espacial interactúan con las condiciones climáticas, por ejemplo zonas de altos rendimientos en años de precipitaciones por debajo de lo normal pueden transformarse en zonas de bajo rendimiento en años con precipitaciones excesivas. Por lo tanto, en estos casos, la variabilidad espacial del rendimiento cambia de una zafra a otra.

De todas maneras, en aquellos casos en que se cuente con una serie importante de mapas de rendimiento de una misma chacra, la observación de los mismos permitiría identificar patrones de variabilidad a lo largo del tiempo. Puede darse el caso que estos patrones de variabilidad, por su complejidad y cambios a lo largo del tiempo, no sean fáciles de identificar visualmente, por lo que existen procedimientos estadísticos avanzados que permiten la detección objetiva de los mismos (Roel et al., 2004b). Estos procedimientos se basan mayoritariamente en el cálculo de los desvíos estándares de los rendimientos en cada zafra con respecto al promedio de cada una de ellas y luego el agrupamiento de los mismos en grupos lo más diferenciados posible.

Es importante tener presente que la comparación de mapas de rendimiento de diferentes zafras no es correcta, ya que un valor de rendimiento que puede ser considerado "alto" en una zafra puede ser "bajo" en otra de mayor potencial productivo. Una manera de evitar esto es trabajar con los valores de los desvíos de rendimiento con respecto al valor promedio de la chacra en cada zafra, lo que se suele llamar mapas de rendimiento "normalizados". En los mapas normalizados se reformulan los mapas de rendimiento llevándolos a un índice relativo con respecto al promedio del lote. Al promedio del lote se le adjudica el valor 100 y cada valor del mapa se le calcula un índice relativo a este valor. Lo que se obtiene es un mapa que expresa las variaciones porcentuales del rendimiento con respecto al promedio. De esta manera todos los mapas de diferentes años con distinto rendimiento promedio y de distintos cultivos están en valores comparables pudiéndose promediar entre sí.

Muchas veces se ha visto, que cuando se hace el ejercicio de visualizar los mapas de rendimientos a lo largo del tiempo junto con los encargados de chacras, ellos tienen una idea de cuáles fueron el o los factores responsables de la variabilidad de rendimiento para cada zafra en particular. Esto es de suma importancia, ya que por un lado de esta manera se puede tener una primera selección de los factores a medir, así como también los posibles delineamientos zonales de éstos.

SISTEMAS DE MUESTREO DISCRETOS

La evaluación del estado de los suelos o cultivos en las chacras se ha basado históricamente en la toma de muestras compuestas colectadas al azar y en la cuantificación de las condiciones promedio de la chacra, sin importar el lugar de donde esas muestras fueron recolectadas. Ejemplos concretos pueden ser cuando un conjunto de muestras de suelos o de plantas son colectadas al azar en una chacra y analizadas para decidir niveles de fertilización promedio para un determinado cultivo o secuencias de cultivos en la misma. Sin embargo, cuando se trata de construir mapas conteniendo valores de parámetros de suelo y plantas en lugares específicos de la chacra para su uso en agricultura de precisión, la situación es totalmente diferente ya que es vital conocer el lugar preciso de donde se recolectaron las muestras.

De acuerdo con Pocknee et al. (1996), la variabilidad presente en una chacra puede agruparse en tres tipos básicos: micro, meso y macro variabilidad. Las dos primeras ocurren en un rango de distancias que van de unos pocos centímetros (ej. aplicación de fertilizantes en bandas) a unos pocos metros (pequeñas zonas erosionadas, aplicaciones desuniformes de agroquímicos, etc.). La macro variabilidad es causada por cambios mayores de suelos, a través de la fisiografía, que pueden deberse a cambios naturales del tipo de suelo o pueden ser el resultado de diferentes historias de manejo en fracciones de la chacra. Cualquier diseño de muestreo de suelos o cultivos debería ser estructurado para que la influencia de la micro y meso variabilidad en el resultado final (mapa) sea minimizada y la influencia de la macro variabilidad maximizada. A los efectos de minimizar el sesgo o error sistemático que se producen en los muestreos, existen varias estrategias o diseños de muestreo que se diferencian básicamente en la disposición o arreglo espacial de los puntos de la chacra a ser relevados.

El diseño de un esquema de muestreo de suelos o cultivos para conocer su variabilidad requiere comúnmente la respuesta de dos preguntas básicas: ¿cuál es el objetivo del muestreo? y ¿qué se conoce? o ¿qué información previa existe del área? (Stein y Ettema, 2003). Para la cuantificación de los patrones de variabilidad de una variable dentro de una chacra existen básicamente dos aproximaciones (Pocknee et al., 1996; Mulla y McBratney, 2002). La primera, asume el desconocimiento previo de la variabilidad de la chacra y la segunda, consiste en esquemas de muestreo alternativos que involucran el uso de información complementaria para mejorar la calidad de la información obtenida. Algunos de los diseños más conocidos son: muestreo al azar simple, muestreo al azar estratificado, muestreo sistemático estratificado, muestreo sistemático estratificado desalineando, muestreo por juzgamiento, muestreo adaptativo, muestreo de búsqueda, muestreo geoestadístico y muestreo dirigido, entre otros (Wollenhaupt et al., 1997; Mulla y McBratney, 2002).

Muestreos al azar

El **muestreo al azar simple** evita el sesgo o error sistemático, ya que todos los puntos de una chacra tienen la misma probabilidad de ser muestreados. Los mayores inconvenientes están dados por los desbalances que se puedan dar en la distribución de los puntos de muestreo en la chacra, lo que implica incertidumbre en los valores interpolados en aquellas áreas con baja densidad de puntos relevados.

El **muestreo al azar estratificado** es una variante del método anterior, en la que el área de relevamiento es dividida en celdas o zonas de forma regular o irregular, y los puntos de muestreo se eligen al azar en su interior. De esta forma se minimizan, aunque no se eliminan, los problemas de distribución de puntos en el área de relevamiento. La elección del tamaño de celda es un factor importante que puede implicar cierto sesgo en este método (**Figura 4.1**).

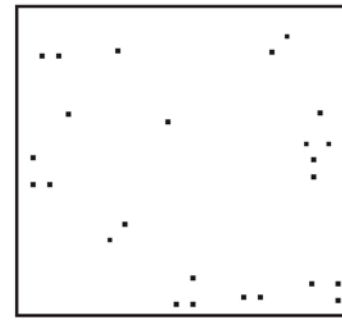


Figura 4.1: Muestreo al azar

Muestreos en grilla

El **muestreo en grillas sistemático** es el más difundido y se usa para evitar desbalances que se puedan dar en la distribución de los puntos de muestreo en la chacra y las dificultades asociadas con la interpolación. La grilla seleccionada puede variar en tamaño y forma. Las formas más comunes de las celdas son cuadradas, rectangulares, hexagonales o triangulares. Aunque las celdas resultantes de grillas cuadradas son las más difundidas para realizar muestreos sistemáticos (**Figura 4.2**), las celdas triangulares son consideradas como las más eficientes para captar variabilidad espacial. Las celdas de grillas rectangulares son recomendadas cuando hay evidencia de que la variabilidad espacial de la variable exhibe anisotropía (depende de la dirección)

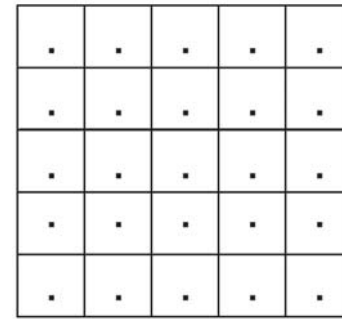


Figura 4.2: Muestreo en grillas sistemático

debido a factores topográficos, de manejo u otros. Una de las mayores razones del uso extensivo del muestreo de grillas cuadradas es la facilidad para orientarse en las chacras para encontrar los puntos de muestreo. La mayor desventaja del muestreo sistemático es que los puntos de muestreo pueden estar alineados con patrones de variación de suelos o trazados de manejo que varían sistemáticamente. Para evitar este sesgo se plantea la alternativa de subdividir las celdas y realizar muestreos aleatorios dentro de las mismas.

El **muestreo sistemático estratificado desalineado** se utiliza para reducir el sesgo introducido por el muestreo sistemático mediante la reducción del alineamiento de los puntos de muestreo en las filas y columnas. Este método consiste en la estratificación de la chacra en celdas uniformes mediante una grilla regular y la posterior subdivisión de estas celdas en celdas más pequeñas de la misma forma. El resultado final es la obtención de puntos de muestreo que están ubicados aproximadamente a la misma distancia, pero no están alineados en las filas y columnas (**Figura 4.3**).

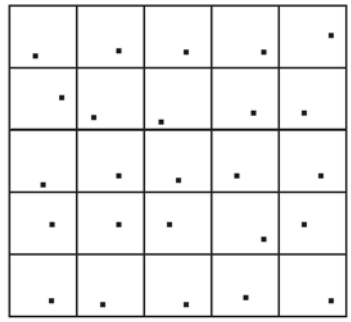


Figura 4.3: Muestreo sistemático estratificado desalineado

Muestreo por juzgamiento

El **muestreo por juzgamiento** es usado cuando el objetivo del muestreo es evaluar suelos o plantas en lugares donde se sospecha o percibe, a juicio del evaluador, algún problema o limitante tales como rendimiento, degradación del suelo o presencia de enfermedades y donde no hay mucho interés en el rigor estadístico del relevamiento.

Muestreo adaptativo

El **muestreo adaptativo** es aplicado en estudios en los que se evalúan propiedades de los suelos o eventos biológicos que tienden a distribuirse en clusters (ej. poblaciones de malezas, insectos o enfermedades). Este método comienza con la implementación de cualquiera de los diseños discutidos anteriormente pero tiene la flexibilidad de que si durante el relevamiento es identificado un sitio de la chacra donde aumenta la presencia de la variable en estudio, entonces se aumenta la frecuencia de muestreo en esa área para su mejor delineación.

Muestreo dirigido

Las estrategias y diseños de muestreo comentadas hasta el momento asumen que nada o muy poco es conocido acerca de la variabilidad espacial de la chacra a ser muestreada. Sin embargo, para la mayoría de las situaciones puede existir información preliminar disponible que permita estimar los patrones de variabilidad espacial de la variable a muestrear en la chacra. Pocknee et al. (1996), sostienen que antes de implementar cualquier diseño de muestreo en grillas se debería tener primero alguna aproximación o estimación de la variabilidad existente en el sitio. Según los autores, la necesidad por esta información previa básicamente niega o contradice por sí misma cualquier aspecto positivo de las metodologías comentadas anteriormente. La información auxiliar puede incluir fotografías aéreas, mapas de suelos, mapas topográficos, mapas de conductividad eléctrica del suelo, mapas de rendimiento, historia de la chacra, registros climáticos, el conocimiento científico de los patrones de variación de la variable estudiada, o inclusive la propia experiencia del productor. Los dos sistemas de **muestreo dirigidos** más conocidos que utilizan información complementaria son el *muestreo geoestadístico* y el *muestreo en zonas*.

El objetivo central del **muestreo geoestadístico** es la obtención de un mapa preciso y exacto al menor costo posible, mediante la respuesta de dos cuestiones fundamentales: ¿cuántos puntos de muestreo necesito para una determinada chacra? y ¿dónde deben estar localizados esos puntos?. La clave es la elección de un diseño de muestreo que permita una correcta estimación del variograma y una alta exactitud en la interpolación realizada por *kriging* para la obtención del mapa. En este sentido, el conocimiento previo de la correlación espacial (variograma) de la variable de interés obtenida de otros trabajos, los patrones de variación fisiográficos en la chacra y el uso de información secundaria que esté altamente correlacionada con la variable de interés y que pueda ser densamente muestreada en la chacra, son todas herramientas utilizadas en el muestreo geoestadístico. El trabajo de McBratney y Pringle (1999), que sintetiza los patrones de variación (variogramas promedio esperados) de un grupo de propiedades del suelo, es un ejemplo de información útil para decidir la distancia entre puntos de muestreo en una grilla. Es aceptado que la distancia entre puntos de una grilla debe ser al menos ½ del rango del variograma.

Adicionalmente, mapas de suelos o topográficos pueden guiar la orientación de la grilla y el ajuste de la intensidad de muestreo en las diferentes direcciones, la idea es reducir la distancia entre puntos en la dirección de mayor variación esperada y aumentar la distancia entre puntos en la dirección de menor variación esperada. Finalmente, información espacial de otra variable que esté correlacionada con la variable de interés ($r > 0.70$) y que pueda ser más intensamente muestreada por ser más fácil y/o más económica de muestrear (ej.: conductividad eléctrica del suelo con textura), puede usarse en el proceso de interpolación (*cokriging*) para mejorar la calidad de los mapas obtenidos (Goovaerts, 1999).

El mapeo de la variabilidad espacial de las propiedades de los suelos y el estado de los cultivos mediante las metodologías de puntos comentadas hasta acá, incluye generalmente tres pasos: *el muestreo, la interpolación y el mapeo*. En este escenario, cada punto de muestreo debe ser identificado individualmente y la ubicación precisa de esos puntos es un factor trascendente en la interpolación realizada por el modelo matemático seleccionado. El diseño del patrón de muestreo y la densidad de muestreo afectan el resultado de los procedimientos matemáticos utilizados para estimar los valores de las variables en los puntos no muestreados resultantes del proceso de interpolación (Mueller et al., 2003a, 2003b; Terra et al., 2004). Aunque es aceptado que el incremento de la intensidad de muestreo redunda generalmente en mapas con mayor exactitud, los costos asociados con muestreos muy intensos y los correspondientes análisis pueden ser prohibitivos a nivel productivo. De la misma forma, el método de interpolación seleccionado también afecta la forma y los patrones de distribución de las variables evaluadas en los mapas (Terra et al., 2004). Otras consideraciones no menos importantes para el muestreo de suelos y plantas, además del número de muestras, incluyen la profundidad de muestreo de suelos, el momento, el tamaño y el número de submuestras por punto de muestreo.

La idea del **muestreo dirigido en zonas** aparece como una alternativa al muestreo en puntos, a los efectos de reducir trabajo, tiempo y costos. La idea consiste en la división de la chacra en áreas más pequeñas, tantas como sean requeridas, basadas en los patrones de variación presentes en la misma, a los efectos de muestrear esas zonas individualmente. Aunque esta técnica recomendada en cualquier libro básico de suelos ha sido históricamente complicada de implementar, con la aparición de los GPS, los SIG y los programas geoestadísticos, la mayoría de estas limitantes son superadas. El mayor desafío para la aplicación de esta técnica consiste en el desarrollo de metodologías que permitan combinar las diferentes capas de información para producir zonas que sean apropiadas a los objetivos del muestreo. Esta metodología de muestreo está claramente relacionada al concepto de zonas de manejo que será abordado más adelante en este capítulo.

En definitiva, las pautas básicas de muestreo para contestar las preguntas: ¿cuántas muestras tomar? y ¿qué diseño utilizar? incluyen: a) información del coeficiente de variación y correlación espacial de la variable a muestrear; b) información complementaria del sitio; c) el número de zonas de manejo esperadas; d) las posibilidades de varios diseños de muestreo; y e) tiempo, trabajo y dinero disponible.

USO DE TÉCNICAS AVANZADAS DE MUESTREOS

Los sistemas de muestreos, en puntos mencionados anteriormente tienen la dificultad por un lado, de que el costo de los análisis de las muestras obtenidas puede ser alto, dependiendo del número de las mismas y por otro lado, la demora en el tiempo de retorno de la información. Es decir, se incurre en un tiempo desde que las muestras son enviadas a un laboratorio, se analizan y se envía la información al cliente. En este sentido, en los últimos años, han aparecido en el mercado una serie de instrumentos y sensores –como el espectrómetro infrarrojo– para determinar el estado hídrico de las plantas, el medidor de clorofila para estimar el contenido de N en planta y los medidores de conductividad eléctrica, los cuales permiten inferir algunas propiedades del suelo en forma instantánea.

En cambio, con los sensores de medición discreta o continua, se dispone de la información inmediatamente, a medida que se va generando. Los métodos de medición continuos como los monitores de rendimiento (presentados previamente) o los sensores de conductividad eléctrica permiten recabar gran cantidad de información en un corto período de tiempo y con una alta resolución espacial. Se les denomina de medición continua, ya que tienen la capacidad de generar o recabar información a intervalos muy cortos, a medida que se mueven dentro de una chacra. Este tipo de sensores tienen un alto potencial en los esquemas de Agricultura de Precisión, ya que permiten generar información en tiempo real a muy bajo costo.

La conductividad eléctrica del suelo (CE) ha sido asociada con múltiples propiedades físicas, químicas y biológicas de los mismos, que regulan su dinámica. El contenido de agua y solutos, la textura, el contenido de carbono (C) orgánico y la mineralogía de la matriz del suelo han sido algunas de las variables más frecuentemente correlacionadas con CE (Noborio et al., 2001; Sudduth et al., 2001; Mueller et al., 2003a). En suelos salinos, la variación espacial de CE está altamente relacionada con la variación espacial de sales, por lo que en estas situaciones el uso de estos sensores es muy efectivo para detectar zonas con problemas de salinidad. En suelos sin problemas de salinidad, la CE se correlaciona principalmente con la textura, el contenido de agua del suelo y la capacidad de intercambio catiónico (Sudduth et al., 2001).

Debido a esto, la determinación rápida de CE con sensores conectados a sistemas de posicionamiento global está siendo crecientemente utilizada para inferir la distribución espacial de algunas propiedades de los suelos y para delinear zonas de manejo en agricultura sitio-específica (Johnson et al., 2001; Johnson et al., 2003; Kitchen et al., 2003; Terra et al., 2004; Terra et al., 2005, en prensa). Algunos estudios han mostrado que la distribución espacial de algunas propiedades del suelo son identificables en el mapa de CE (ej.: mapas de CE con mapas de distribución espacial del contenido de arcilla). Sin embargo, la determinación de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo de interés asociada con la variación espacial de CE es aún problemática.

La efectividad del mapeo de CE como estimador de alguna propiedad del suelo decrece cuando más de una variable correlacionada con CE cambia a través de la fisiografía. Debido a que la CE está correlacionada con varias propiedades del suelo y que la mayoría de éstas presentan covarianza entre ellas, la estimación de una única variable de respuesta o del peso relativo de las mismas a partir de mapas de CE es muy compleja o imposible. Sin embargo, la variabilidad espacial de CE es indicativa al menos de diferentes condiciones de suelo, lo cual puede ser utilizado a la hora de definir zonas de muestreos. La variabilidad de CE puede estar también relacionada a atributos fisiográficos que influencian significativamente las propiedades de los suelos y la productividad de los cultivos.

Existen dos tipos básicos de sensores de CE en tiempo real: sensores de contacto directo que miden la resistividad eléctrica (Veris 3100, Veris Technologies, Salinas, KS) y sensores de no-contacto que miden inducción electromagnética (Geonics EM38, Geonics Limited., Mississauga, ON, Canadá).

Aunque los dos tipos de sensores tienen diferentes capacidades y algunas ventajas y desventajas con respecto al otro, los datos y mapas obtenidos en chacras con ambos sistemas indican que los mismos están altamente correlacionados espacial y temporalmente (Sudduth et al., 2003).

El sensor desarrollado por Veris Technologies mide la conductividad eléctrica aparente del suelo en las profundidades de 0-30cm y 0-90cm y opera mediante la descarga de una corriente eléctrica por discos en contacto con el suelo montados sobre una barra, mientras es arrastrado por un vehículo a través de la chacra. Al mismo tiempo, dos discos que actúan como electrodos colocados a la misma distancia miden la caída de voltaje para finalmente, convertir la resistividad en conductividad eléctrica. Normalmente los valores de CE en profundidad son mayores a los observados en superficie debido al incremento del contenido de agua y de arcilla del suelo.

El EM38 mide CE a través de la relación entre dos campos magnéticos generados por el sensor en el suelo (Corwin and Lesch, 2003). El EM38 puede ser operado en dos modos de medición: el modo de dipolo vertical provee una medición efectiva hasta una profundidad de 1,5m; mientras que el modo de dipolo horizontal permite una medida efectiva hasta 0,75m. La respuesta del instrumento a la conductividad eléctrica tiene una función de respuesta no lineal con la profundidad del suelo. Este sensor requiere 3-4 calibraciones diarias durante su utilización debido a su alta sensibilidad a los cambios de las condiciones climáticas.

ZONAS DE MANEJO

Dado que las variables agronómicas y ambientales son espacialmente heterogéneas, la agricultura de precisión ha evolucionado como un método de producción en el que la variabilidad es identificada, cuantificada y manejada. Una vez que las causas de variación de productividad de una chacra han sido identificadas, es necesario tomar las decisiones de manejo adecuadas. En algunos casos, la decisión de manejo no implica necesariamente la variación de un insumo a través de la chacra, sino sólo un ajuste de la cantidad aplicada del mismo para mejorar la eficiencia en todo el cultivo. En otras situaciones puede darse que la variación de rendimiento de un cultivo esté asociada a un solo factor limitante principal, como en el caso de algún nutriente esencial para el cultivo que puede ser ajustado mediante alguna técnica de aplicación variable. Sin embargo, la formación del rendimiento de los cultivos es un proceso extremadamente complejo que involucra la interacción de varios factores bióticos y abióticos. En los casos en que más de un factor esté influenciando el rendimiento, o que diferentes factores influencien el rendimiento en distintas partes de la chacra, la situación es más compleja. La estrategia para enfrentar y superar este tipo de complejidad es encontrar los factores dominantes que limitan el rendimiento en determinadas zonas de la chacra.

Desde este punto de vista, el objetivo central de la AP es entonces, la obtención de zonas de manejo definidas por sus factores limitantes del rendimiento, para ser manejadas de acuerdo a sus propiedades intrínsecas. La estrategia general consiste en la identificación de zonas en las chacras que puedan ser delineadas, agrupadas y manejadas similarmente a los efectos de optimizar la aplicación de insumos y las medidas de manejo para maximizar los ingresos.

Las zonas de manejo, tal como están definidas, posiblemente sean tan antiguas como la propia agricultura, ya que cualquier productor –de una u otra manera– ha prestado en alguna oportunidad más atención a alguna parte de la chacra que a otra. Indudablemente, los avances tecnológicos que representan la aparición de las herramientas de AP (GPS, SIG, etc.) les brinda a los agricultores la oportunidad de poner en práctica ese concepto de una forma más objetiva.

Una de las principales ventajas de subdividir la chacra en zonas de manejo es que proporciona una herramienta práctica para esquematizar la distribución espacial de factores potencialmente

limitantes del rendimiento en la chacra. Según Fraisse et al. (2001) y Plant et al. (2001), los principales requerimientos que las zonas de manejo deben cumplir para ser consideradas como tales son: a) las diferencias de rendimientos entre zonas de manejo debe ser mayor que las diferencias dentro de la zona; y b) los factores limitantes de rendimiento dentro de la zona deben ser los mismos. Es importante mencionar que las zonas de manejo no implican necesariamente recomendaciones de manejo diferenciales entre ellas o que las mismas sirvan para todas las aplicaciones de agricultura de precisión. Es también reconocido que las zonas de manejo pueden ser bastantes diferentes dependiendo de las condiciones ambientales, el cultivo y el manejo de suelos utilizado. Por tanto, las zonas de manejo deberían ser analizadas, evaluadas y ajustadas en el tiempo, ya que las mismas no son necesariamente estáticas y posiblemente varíen ante cambios en las prácticas de manejo general de los productores. Pueden ser necesarios muchos años de datos para entender completamente las interacciones entre la variabilidad espacial y temporal en las propiedades de los suelos y la productividad de los cultivos.

La interrogante de cuántas zonas necesita una chacra es una de las más clásicas entre productores y técnicos. El número de zonas de manejo dentro de una chacra va a estar dado por la variabilidad natural de la chacra, el tamaño de la chacra y algunos factores prácticos de manejo. Así es que una chacra puede contener varias zonas, solamente una en caso de que toda la chacra sea considerada una unidad de manejo, o en el caso que varias chacras sean agrupadas como una unidad de manejo.

Tampoco existen reglas fijas ni limitantes extremas para la elección del tamaño y la forma de las zonas de manejo, principalmente si las aplicaciones o implementos son guiados por GPS. Tal vez, el tamaño mínimo o la forma de una zona esté limitado por la habilidad del productor de poder manejarla individualmente, lo que está muy relacionado a las dimensiones y capacidades del parque de maquinaria, a las características físicas de la chacra y a la dirección o patrón de trabajo de la maquinaria. Aunque los límites de las zonas de manejo pueden ser imaginados en término difusos (continuos), en la práctica resulta mejor imaginar los mismos en términos de límites fijos.

La investigación y los usuarios han propuesto varios caminos y fuentes de información para delinear estas zonas de manejo incluyendo los mapas de rendimiento, los mapas de suelos, la percepción remota, las fotografías aéreas, el muestreo de grillas, atributos topográficos y hasta el propio conocimiento del productor de su chacra.

Mapas de rendimiento

Según algunos autores, los mapas de rendimiento son la mejor herramienta para la delineación de zonas de manejo, ya que el rendimiento del cultivo sería el mejor indicador de la productividad del suelo en las distintas áreas de una chacra. Sin embargo, existen objeciones al uso exclusivo de esta información concerniente a la estabilidad temporal de las zonas de bajo y alto rendimiento, al tiempo necesario para generar un número de mapas que reduzcan la incertidumbre y a la interacción que pueda existir con el tipo de cultivo o prácticas de manejo usadas por el productor. Aunque la premisa fundamental de la agricultura de precisión y la delineación de zonas de manejo es la presencia de variabilidad espacial, la persistencia temporal de estos patrones de rendimientos en las chacras es fundamental para el establecimiento de zonas de manejo basadas exclusivamente en mapas de rendimiento. Independientemente de que los mapas de rendimiento se usen o no en la delineación de las zonas de manejo, éstos son la herramienta fundamental para chequear la bondad o eficiencia de las zonas de manejo creadas para detectar diferencias en productividad (Fraisse et al., 2001).

Mapa de relevamiento de suelos

La información proveniente de los mapas de suelos que puedan existir de una chacra es una de las estrategias que primero intentaron ser usadas para la elección de zonas de manejo. Los relevamientos semi-detallados describen la variabilidad del suelo a escalas que van desde 1:12000 a 1:24000 (Orden II en la denominación del USDA), mientras que los relevamientos detallados proveen información a escala 1:5000 (Orden I). Los suelos son usualmente descriptos, clasificados y mapeados de acuerdo a un conjunto de técnicas convencionales de relevamiento convenidas en un sistema taxonómico de clasificación. La información de los relevamientos consiste en la localización geográfica de los suelos (delineación), datos de laboratorio (textura, densidad aparente, capacidad de intercambio catiónico) e interpretaciones. Esta información es organizada en unidades de mapeo, que consiste en una síntesis de delineaciones individuales nombradas similarmente en la fisiografía. Debido a que pocas unidades de mapeo son homogéneas, la descripción de una unidad de mapeo está relacionada a los suelos característicos más factibles de ser hallados en la delineación del mapa. Cuando la escala del relevamiento o la complejidad de la fisiografía no permiten la delineación de los suelos en unidades individuales, las unidades de mapeo incluyen una combinación de series. Este método de agrupar suelos es la manera usual de minimizar variabilidad y agrupar suelos de comportamiento similar. Aunque estos mapas de suelos dan una idea general de los efectos de las unidades de mapeo en la productividad de los cultivos, los mismos no han sido creados para realizar recomendaciones de manejo de suelos y cultivos a la escala normalmente requerida por las prácticas de agricultura de precisión. La variación de suelos a nivel predial no puede ser totalmente descripta por las unidades de mapeo porque existe considerable variación que no es tenida en cuenta para la clasificación de suelos. Las principales fuentes de variación a nivel de unidades de mapeo están dadas por errores de mapeo y clasificación, ubicación de límites y principalmente por alteraciones generadas por las prácticas de manejo de suelos y cultivos aplicadas por el hombre. Dado que la taxonomía de suelos ha sido desarrollada enfatizando en propiedades de los horizontes sub-superficiales, muchas de las propiedades dinámicas superficiales de los suelos no son reflejadas en la clasificación taxonómica. En ese sentido, la investigación ha mostrado que algunas prácticas agronómicas pueden afectar significativamente algunas propiedades de los suelos en la superficie, tales como materia orgánica, estabilidad de agregados e infiltración entre otros. Claramente, esto limita la delineación de zonas de manejo basada exclusivamente en este tipo de mapas.

Percepción remota

La información proveniente de imágenes satelitales e imágenes aéreas (comentada en el capítulo 5) puede ser utilizada a la hora de definir zonas de muestreos o zonas de manejo. Por ejemplo, una estrategia muy común utilizada en agricultura de precisión es la de calcular índices de vegetación con la información provenientes de estas imágenes. Estos índices reflejan la variabilidad espacial de las condiciones de crecimiento de los cultivos, ya que estiman la cantidad de materia seca producida, la cual es reflejo de las condiciones de crecimiento de los cultivos. Por ende, estos índices son indicadores de las diferentes condiciones en los factores que afectan la productividad de las chacras.

Mapas de propiedades de los suelos o condición de cultivo obtenidos geoestadísticamente

La distribución espacial de las propiedades de los suelos mediante el uso de técnicas de interpolación geoestadística puede realizarse a partir de datos recabados en una grilla de muestreo, como ya fue explicado. La principal desventaja de este método está dada por la significativa cantidad de muestras que deben ser colectadas y analizadas para una correcta representación de

la variabilidad presente. Esto implica una alta inversión de trabajo, tiempo y dinero, que es prohibitivo a nivel productivo. Sin embargo, algunas propiedades de los suelos más estables temporalmente (estáticas) que son poco afectadas por el manejo tales como textura, contenido de C orgánico, CE, capacidad de intercambio catiónico, entre otras, pueden ser de extremo valor y podrían ser relevadas en una única oportunidad, principalmente para su uso en la delineación de zonas de manejo junto a atributos de terreno que se discutirán a continuación.

Atributos fisiográficos estables temporalmente

Otra alternativa a los efectos de definir zonas de manejo consiste en el uso de datos estables en el tiempo, tales como, atributos de terreno (elevación, pendiente, área cuenca, etc.) en combinación con algunas propiedades estáticas de los suelos (CE, textura, materia orgánica, etc.), para estimar patrones de variación de suelos utilizando modelos edafo-topográficos o técnicas estadísticas de análisis de clusters. Los atributos de terreno tienen gran influencia sobre algunas propiedades de los suelos por el simple hecho de que la topografía es uno de los cinco factores de formación de suelos. En cultivos extensivos de secano se ha encontrado que los patrones de disponibilidad de agua para los cultivos, resultante de la interacción entre las propiedades estáticas de los suelos, la topografía y la variabilidad temporal relacionada a factores climáticos, explican gran parte de la variabilidad de rendimiento de los cultivos a través de la fisiografía. La variación remanente en productividad puede estar dada por las influencias en disponibilidad de nutrientes, presión de plagas y manejos previos de chacra. Por ej., Wester et al. (1999), encontraron que el contenido de agua del suelo estuvo relacionado a la pendiente y área de cuenca durante períodos lluviosos y a la radiación solar recibida durante períodos secos. En otro estudio, Moore et al., (1993), encontraron que la profundidad del horizonte A, el contenido de C orgánico, el fósforo (P) extractable, el pH y la textura del suelo estuvieron correlacionadas con la pendiente y con un índice compuesto topográfico. Por lo tanto, los atributos de terreno afectan las propiedades de los suelos y los efectos combinados del terreno; y las propiedades dinámicas y estáticas de los suelos a su vez, afectan la productividad de los cultivos. Timlin et al. (1998) y Bongiovanni (2002), hallaron una alta correlación entre la convexidad/concavidad del terreno de una chacra y la variabilidad especial y temporal del rendimiento del cultivo de maíz.

La tendencia general es al uso y combinación de más de una fuente de información que generalmente está asociada a su disponibilidad, facilidad de acceso y costo, así como a su capacidad de procesamiento y comprensión por parte de los usuarios. En general, no existen reglas para delinear las zonas, a nivel productivo depende básicamente de los recursos y en las habilidades de los usuarios a la hora de usar la información. La creación de zonas de manejo requiere de una dosis importante de sentido común y de habilidades, entre las que se destacan la capacidad de combinar los conocimientos agronómicos, el conocimiento del establecimiento, de la historia de la chacra y por último, las capacidades y limitantes del parque de maquinaria.

Una de las principales limitantes en agricultura de precisión es, sin duda, la simplificación de la información para su uso eficiente en crear zonas de manejo de alguna forma objetiva.

PASOS LÓGICOS EN INVESTIGACIÓN

El primer paso consiste en poner toda la información disponible en la misma escala y coordenadas para poder conocer para cada punto de la chacra su combinación única de variables. El paso siguiente debería ser conocer que variables explican la mayor parte de la variación de la chacra. Algunas técnicas de estadística multivariada, tales como el análisis de componentes principales y el análisis de factores, han mostrado ser particularmente efectivas para identificar las variables de la información original que explican la mayor parte de la variabilidad en las chacras y para reducir la dimensión de la información en un menor número de variables no correlacionadas entre sí (Fraisse et al., 2001; Terra et al, 2004; Terra et al., 2005 en prensa). El tercer paso, es cuantificar cuál de estas variables, describiendo la mayor parte de la variación de la chacra, están efectivamente relacionadas con el rendimiento de los cultivos. En este sentido, los procedimientos estadísticos de análisis de regresión o los CART han sido alguna de las herramientas estadísticas más usadas (Roel et al., 2004b). Una vez que se han determinado cuáles son las variables que tienen mayor efecto en el rendimiento, el siguiente paso lógico es el uso de esa información para crear las zonas de manejo. El análisis de clusters es una de las herramientas estadísticas más extendidas para la creación de zonas de manejo, debido a la objetividad y neutralidad del procedimiento. En este sentido, el software "Analizador de Zonas de Manejo" (MZA) desarrollado por Fridgen et al. (2004), que está basado en el procedimiento de análisis de cluster no supervisado de medias k difusas, es un notable adelanto práctico para crear zonas de manejo a nivel productivo. Este programa calcula algunas estadísticas descriptivas para los datos, realiza el análisis de clusters para un rango de zonas de manejo solicitadas y utiliza un par de índices de performance para ayudar a decidir objetivamente el número óptimo de zonas de manejo para la chacra. La bondad o efectividad de las zonas de manejo en captar la variabilidad de rendimiento puede ser corroborada fácilmente por un procedimiento descrito por Fraisse et al. (2001), que cuantifica la proporción de la varianza total de la chacra explicada por la subdivisión de la misma en las zonas de manejo. Según los autores, el número óptimo de zonas de manejo es aquel que provoca la máxima reducción de varianza. Finalmente y como ya se comentó, se deberá tener presente que las zonas de manejo no necesariamente son las mismas para diferentes cultivos, años o manejos generales de la chacra (Fraisse et al., 2001; Terra et al., 2005 en prensa).

PASOS LÓGICOS A NIVEL PRODUCTIVO

Los pasos lógicos a nivel productivo serían: 1) juntar la máxima información posible de la chacra como sea posible; 2) georeferenciar la información; 3) identificar aquellas áreas que, por sentido común o conocimiento agronómico, se podrían beneficiar más claramente por un manejo diferencial; 4) delinear esas zonas; 5) fijar o establecer expectativas de rendimiento para esas zonas; y 6) monitorear el rendimiento de esas zonas en la zafra y en el tiempo, tratando de entender su evolución, para proponer cambios en su manejo.

En definitiva, todo lo anterior indica que este es un proceso de aprendizaje, ajuste y mejora continua. Todo proceso de implementación de adopción de agricultura de precisión debería de comenzar por regular aquellos factores más fácilmente accesibles, para luego continuar por intentar manejar aquellos más complejos.

REFERENCIAS

Bongiovanni, R. 2002. "A Spatial Econometrics Approach to the Economics of Site-Specific Nitrogen Management in Corn Production". Ph.D. Thesis, Department of Agricultural Economics, Purdue University, West Lafayette, IN (USA), 280 p. Available at: http://www.agriculturadeprecision.org/articulos/analecon.htm

Corwin, D.L. y Lesch, S.M. 2003. Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture: Theory, Principles, and Guidelines. Agronomy Journal 95:455.

Fraisse, C.; Sudduth, K. y Kitchen, N. 2001. Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. Transactions of the ASAE. 44: 155-166.

Fridgen, J.J.; Kitchen, N.R.; Sudduth, K.A.; Drummond, S.T.; Wiebold, W.J. y Fraisse, C.W. 2004. Management Zone Analyst (MZA): Software for Subfield Management Zone Delineation. Agronomy Journal 96:100-108.

Goovaerts, P. 1999. Geostatistics in soil science: state of the art and perspectives. Geoderma 89:1-45.

Johnson, C.; Doran, J; Duke,H.; Wienhold, B.; Eskridge, K. y Shanahan, J. 2001. Field scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition. Soil Science Society of America. 65:1829-1837.

Johnson, C.K. 2003. Site-Specific Management Zones Based on Soil Electrical Conductivity in a Semiarid Cropping System. Agronomy Journal 95: 303.

Kitchen, N.R. et al. 2003. "Soil Electrical Conductivity and Topography Related to Yield for Three Contrasting Soil-Crop Systems." Agronomy Journal 95.3 : 483.

Kitchen, N.R.; Sudduth, K.A. y Fridgen, J.J. 2000 – 2001. "Influence of claypan soil topsoil thickness and fertility factors on corn and soybean yield." Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA, 16-19 July, 2000 2001. 1-16. 20 ref. -16.

Kitchen, N.R.; Sudduth, K.A. y Drummond, S.T. 1999. "Soil electrical conductivity as a crop productivity measure for claypan soils." Journal of Production Agriculture 12.4 607-17.

McBratney, A.B. y Pringle, M.J. 1999. Estimating average and proportional variograms of soil properties and their potential use in precision agriculture. Precision Agriculture. 1:125-152.

Moore, I.D.; Gessler, P.E.; Nielsen, G.A. y Peterson, G.A. 1993. Soil attributes prediction using terrain analysis. Soil Sci. Soc. Am. J. 57:443-452.

Mueller, T.G.; Hartsock, N.J.; Stombaugh, T.S.; Shearer, S.A.; Cornelius, P.L. y Barnhisel, R.I. 2003a. Soil Electrical Conductivity Map Variability in Limestone Soils Overlain by Loess. Agronomy Journal 95:496-507.

Mueller, T.G. y Pierce, F.J. 2003b. Soil carbon maps: enhancing spatial estimates with simple terrain attributes at multiple scales. Soil Science Society of America Journal 67: 258-267.

Mulla, D.J. y McBratney, A.B. 2002. Soil Spatial Variability. p. 343-373. In: A.W. Warrick (Editor) Soil Physics companion. CRS Press, Boca Raton, FL.

Mulla, D.J. y Schepers, J.S. 1997. Key processes and properties for site-specific soil and crop management. p. 1-18. In: Pierce, F.J. y Sadler, E.J (editors). The state of site-specific management for agriculture. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI.

Plant, R.E. 2001. Site Specific Management: the application of information technology to crop production. Computers and Electronic in Agriculture 30: 9-29.

Pocknee, S.; Boydell, B.C.; Green, H.M.; Waters, D.J. y Kvien, C.K. 1996. Directed Soil Sampling. In*:* Roberts, P.C.; Rust, R.H. and Larson, W.E. (Ed.) Proceeding of the 3rd International Conference of Precision Agriculture. Minneapolis, Minnesota. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI.

Roel, A. y Plant, R.E. 2004a. Factors Underlying Yield Variability in Two California Rice Fields. Agronomy Journal 96: 1481-1494.

Roel, A. y Plant, R.E. 2004b. Spatiotemporal Analysis of Rice Yield Variability in Two California Fields. Agronomy Journal 96 (1): 77-90.

Stein, A. y Ettema, C. 2003. An overview of spatial sampling procedures and experimental design of spatial studies for ecosystem comparisons. Agriculture Ecosystems and Environment 94:31-47.

Sudduth, K.A. et al. 2003. Comparison of Electromagnetic Induction and Direct Sensing of Soil Electrical Conductivity. Agronomy Journal 95: 472.

Sudduth, K.A.; Drummond, S.T. y Kitchen, N.R. 2001. "Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture." Computers & Electronics in Agriculture 31.3 (2001): 239-64.

Terra, J.A.; Shaw, J.N.; Reeves, D.W.; Raper, R.L.; van Santen, E.; Schwab, E.B. y Mask, P.L. 2005. Soil management and landscape variability affects field-scale cotton productivity. Soil Sci. Soc. Am. J. (Aceptado, en prensa).

Terra, J.A.; Shaw, J.N.; Reeves, D.W.; Raper, R.L.; van Santen, E. y Mask, P.L. 2004. Soil carbon relationships with terrain attributes, electrical conductivity and soil survey in a Coastal Plain landscape. Soil Science 169: 819-831.

Timlin, D.J.; Pachepsky, Y.; Snyder, V.A. y Bryant, R.B. 1998. Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope. Soil Science Society of America Journal 62 (3):764-773.

Wester, A.W.; Grayson, R.B.; Bloschl, G.; Willgoose, G.R. y McMahon, T.A. 1999. Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices. Water Resources Research 35:797-810.

Wollenhaupt N.C.; Mulla, D.J. y Gotway Crawford, C.A. 1997. Soil sampling and interpolation techniques for mapping spatial variability of soil properties. p. 19-54. *In*:

CAPÍTULO 5

SENSORES REMOTOS

Mauricio Alves Moreira (1)
mauricio@ltid.inep.br
(1) Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE),
División de Sensoriamiento Remoto (DSR)
San José dos Campos, San Pablo, Brasil.

PRINCIPIOS BÁSICOS DE APLICACIÓN

Radiación solar

La radiación emanada del sol hacia el universo no es una entidad física única. Isaac Newton (1642-1727) contribuyó en buena medida a explicar la naturaleza de la radiación solar. En su trabajo sobre óptica concluyó que la luz blanca no es una entidad simple, como creían todos desde Aristóteles. Más tarde, en 1905, su teoría fue corroborada por Albert Einstein al afirmar que el Sol emite haces de radiación, a los que denominó "quantum", y propuso el siguiente modelo matemático para determinar la energía "E":

$$E = h \cdot \nu$$

siendo, h la constante de Planck, con un valor de $6{,}63 \times 10^{-34}$ J s^{-1}, y ν la frecuencia de la radiación.

La frecuencia está, a su vez, asociada a la longitud de onda (λ) por la expresión:

$$c = \lambda \cdot \nu \quad \rightarrow \quad \nu = c / \lambda$$

Sustituyendo en la ecuación de E el valor de ν, se obtiene:

$$E = h \cdot c / \lambda$$

Asimismo, en el Siglo XIX, otros investigadores hicieron grandes aportes a los estudios sobre la radiación solar. De esas discusiones surgieron dos teorías: una que afirma que la luz está formada por partículas, conocida como Teoría corpuscular de la luz y otra según la cual la luz es una onda, denominada Teoría ondulatoria (Halliday y Resnick; 1968; Parada y Chiquetto, 1980). En esa época H.C. Oersted descubrió también que la radiación solar está compuesta por un elemento eléctrico y otro magnético, según se muestra en **Figura 5.1.**

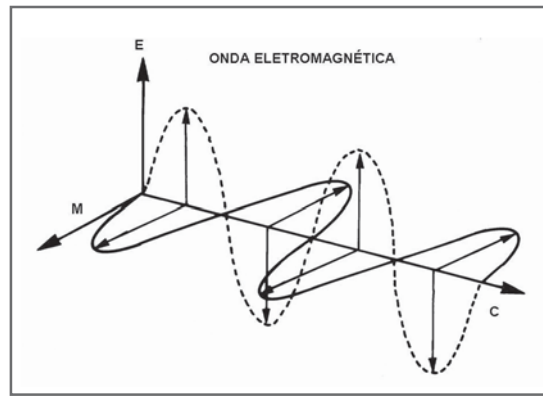


Figura 5.1: Esquema de una onda electromagnética: campo eléctrico (E), campo magnético (M) y sentido de propagación (C).

Una forma práctica de organizar las diferentes radiaciones electromagnéticas fue ordenarlas en un gráfico, de acuerdo con las diferentes intensidades, frecuencias y longitudes de onda. Ese ordenamiento recibió el nombre de espectro electromagnético. Posteriormente, se observó que

algunos grupos de radiaciones, cuando entraban en contacto con objetos, presentaban algunas propiedades físicas o químicas semejantes. De este modo, el espectro electromagnético se dividió en intervalos, según las características de esas radiaciones. Los nombres de esas bandas están asociados a la naturaleza histórica o surgen de los procesos utilizados en su producción o determinación, según se muestra en el **Cuadro 5.1** (Steffen et al., 1996).

Cuadro 5.1: Nomenclatura y banda espectral de las radiaciones para diferentes longitudes de onda

Nombre	Banda Espectral	Características
Radiación Gama	< 1 ángstrom	Absorbidos por los gases de la atmósfera
Rayos X	≥ Å - 0,01 μm	
Radiación ultravioleta UV cercano UV lejano UV máximo	0,1 a 0,49 μm 0,32 a 0,40 μm 0,28 a 0,32 μm 0,1 a 0,7 μm	Absorbidas casi totalmente por los gases de la atmósfera
Radiación visible	0,4 a 0,7μm	Sensible para el sistema visual y utilizada por las plantas, para fotosístesis.
Radiación infrarroja Infrarrojo cercano Infrarrojo medio Infrarrojo lejano	0,7 a 1,0 μm -0,7 a 1,1 μm -1,1 a 3,0 μm -3,0 a 1000 μm	Radiación muy reflejada por la vegetación. Denominada a veces radiación térmica.
Microondas	1000 μm a 1 x 10^5 (1m)	Más comúnmente referenciada en Hertz (300 Ghz a 300 Mhz). Muy utilizadas en telecomunicación.
Ondas de Radio	< 1 m ó 300 Mhz	Muy utilizadas en telecomunicación

En el **Cuadro 5.2** figuran los colores que componen la luz blanca y las respectivas bandas del espectro electromagnético expresadas en nanómetro (nm) y micrómetro (μm).

En esta región del visible, se consideran solamente tres intervalos de longitud de onda para la percepción remota: azul (400 a 500 nm), verde (500 a 600 nm) y rojo (600 a 700 nm).

La Tierra recibe del sol una potencia (energía/segundo) de 1400 watts, establecido por James Watt (1736-1819), es decir, la potencia de 14 lámparas de 100 watts/m^2. El valor más preciso de la constante solar es de 1367,5 W/m^2 y varía 0,3% durante el ciclo solar de 11 años (Ache Tudo e Região, 2005).

Para la percepción remota, la energía solar es la base de todos los principios sobre los que se fundamenta esta tecnología. Más adelante, veremos que hasta los sistemas sensores activos, es decir, aquellos que poseen energía propia, necesitan radiación solar para mantener sus reservas de energía.

La radiación electromagnética se expresa en varias unidades en función de la longitud de onda para ciertas bandas del espectro electromagnético y en función de la frecuencia para otras.

Cuadro 5.2: Relación de colores y bandas espectrales en la región del visible

Color	Longitud de onda	
	Nanómetro (nm)	Micrómetro (μm)
Violeta	400 a 446	0,400 a 0,446
Azul	446 a 500	0,446 a 0,500
Verde	500 a 578	0,500 a 0,578
Amarillo	578 a 592	0,578 a 0,592
Naranja	592 a 620	0,592 a 0,620
Rojo	620 a 700	0,620 a 0,700

Para las radiaciones electromagnéticas de longitud de onda de dimensiones muy pequeñas, o sea, aquellas radiaciones localizadas en las regiones del infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos gama etc., se utilizan, como unidades de referencia, los submúltiplos del metro, como el nanómetro (1 nm = 0.000000001m o 10^{-9} m), micrómetro (1 μm = 0.000001m o 10^{-6} m) y ángstrom (1 Å = 10^{-10} m).

En el caso de la radiación con grandes longitudes de onda, como ondas de radio, la unidad de referencia se establece en función de la frecuencia. En esa situación se emplean los múltiplos de Hertz. Se tiene entonces, el kilohertz (1 KHz = 10^3), o megahertz (1 MHz = 1.000.000 o 10^6 Hz de ciclos por segundo) y el gigahertz (1 GHz = 1.000.000.000 o 10^9 Hz de ciclos por segundo).

Interacción de la radiación electromagnética (REM) con la vegetación, el suelo y el agua

La REM que llega a la superficie de la Tierra interactúa con todos los objetos (elementos) y, esa interacción, se puede dividir en tres fracciones. Una parte es absorbida, otra es transmitida y una tercera parte es reflejada. Sin embargo, las proporciones de estos tres componentes guardan siempre el principio de la conservación de energía, expresado por la segunda ley de la termodinámica, o sea:

$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t$$

siendo Φ_i, Φ_r, Φ_a y Φ_t los flujos (cantidades) de energía incidente, reflejada, absorbida y trasmitida, respectivamente.

Tomando la ecuación arriba en relación al flujo incidente (Φ_i), se obtiene:

$$1 = \rho + \alpha + \tau$$

en que, las razones adimensionales ρ, α y τ son denominadas reflectancia, absorbancia y transmitancia, respectivamente, y cuyos valores definen las propiedades radiométricas de los elementos analizados.

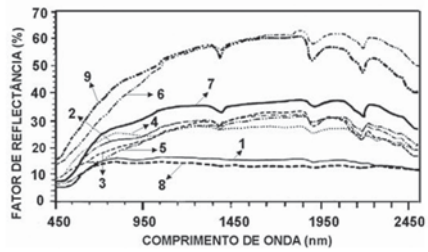
En la percepción remota se consideran solamente tres tipos de objetos (o elementos), vegetación, suelo y agua. Asimismo, toda tecnología de la percepción remota (terrestre, aérea u orbital) se basa en la recolección y análisis de la energía reflejada.

La radiación solar al llegar a la planta, interactúa con ésta y se divide en tres fracciones. Una parte, aproximadamente 50% del total que llega hasta la planta, es absorbida por los pigmentos de la hoja y participa en la síntesis de compuestos ricos en energía (fotosíntesis), altera estructuras moleculares (fotoconversión), acelera reacciones, como la foto-oxidación de las xantofilas o, también, destruye estructuras de una molécula. Otra parte es reflejada por las hojas, fenómeno denominado reflexión. Finalmente, una tercera parte sufre el proceso de transmisión, a través de las capas de hojas que componen la copa y de aquellas que constituyen la hoja, como la cutícula, el parénquima lagunar y parénquima en empalizada, etc. La cantidad de energía absorbida, trasmitida o reflejada por las hojas de las plantas puede diferir de una especie a otra, o también dentro de la propia especie porque existen, entre otros, factores ambientales que influencian directa o indirectamente en esta interacción.

De modo general, las hojas de las plantas absorben considerablemente las radiaciones del azul (400 a 500 nm) y de la región del rojo (600 a 700 nm), que son las energías utilizadas en la fotosíntesis. Al reflejar más la radiación verde (500 a 600 nm), el sistema visual las ve como verdes, es decir, esas radiaciones son capaces de provocar una sensación de color verde en el cerebro.

Al no participar en el proceso fotosintético, la radiación del infrarrojo cercano se refleja bastante. En el infrarrojo medio, el agua la absorbe internamente en los tejidos de la planta. Toda técnica de interpretación de productos remotamente percibidos se vale de esas propiedades.

En el caso del suelo, la interacción de la REM está muy relacionada con la textura del horizonte que se encuentra en la superficie. Es importante porque, dependiendo de su granulometría, la radiación electromagnética puede interactuar con los componentes del suelo en mayor o menor intensidad. Por ejemplo, si un suelo presenta, en su horizonte superficial, una composición de 80% de arena, 10% de lodo y 10% de arcilla, se lo clasifica como arenoso. En esta situación, el suelo presenta, muy probablemente, una alta reflectividad, o sea, gran parte de la energía incidente sobre él es reflejada. Esta energía, cuando es captada por algún sistema sensor y transformada en productos que puedan ser analizados por métodos visuales o automáticos, presentará tonos de gris bastante claros respecto a otros suelos más arcillosos. Los gráficos de la **Figura 5.2** ilustran la influencia del Fe_2O_3 en el comportamiento espectral de diferentes tipos de suelos del Estado de San Pablo.



Classe de Solo	Teor de Fe2O3 (%)
Latossolo Roxo (LR)	21,3
Latossolo Vermelho-Escuro (LE)	8,3
Latossolo Vermelho-Amarelo (LA)	5,9
Latossolo Una (LU)	7,0
Latossolo Húmico (LH)	3,6
Podzólico Vermelho-Amarelo (PA)	0,3
Podzólico Vermelho-Escuro (PE)	3,6
Terra Roxa Estruturada (TE)	25,6
Cambissolo (Cb)	2,1

Figura 5.2: Curvas de reflectancia para diferentes tipos de suelos del Estado de San Pablo con diferentes tenores de Fe2O3. Adaptada de Epiphânio et al. (1992).

En cuanto al agua, debe considerarse que, a temperatura ambiente, se la encuentra en tres estados físicos: sólido, líquido y gaseoso. En cada uno de ellos, la absorción de la radiación electromagnética se produce de manera diferente (**Figura 5.3**, Bowker et al., 1895).

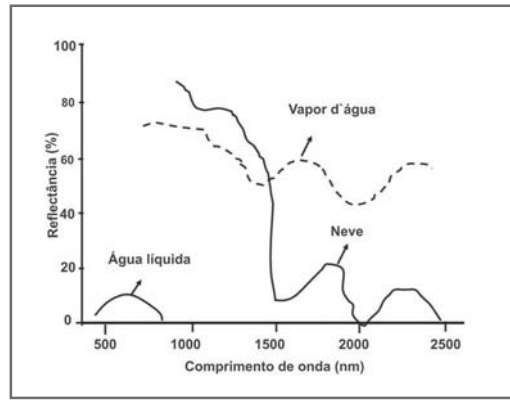


Figura 5.3: Curvas de reflectancia del agua en diferentes estados: sólido, líquido y gaseoso.

Para comprender mejor la reflectancia de la radiación solar de esos tres elementos, en el gráfico de la **Figura 5.4** se hizo un ploteo del comportamiento espectral de los tres elementos juntos: agua, vegetación y suelo.

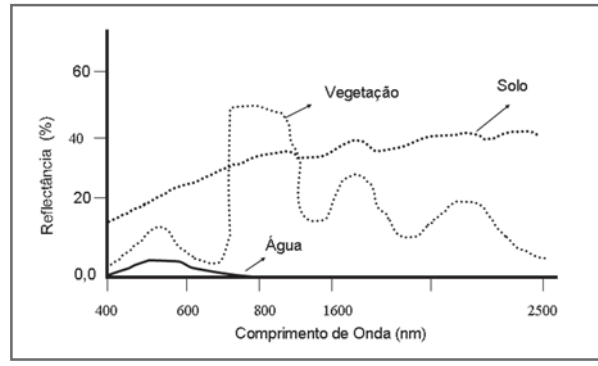


Figura 5.4: Curva de reflectancia de agua, vegetación y suelo.

SISTEMAS SENSORES

Los equipos que permiten cuantificar la radiación electromagnética son genéricamente denominados **radiómetros** (radio = radiación y metro = medida). Ahora bien, según la forma de recolectar y registrar la radiación se los puede clasificar en **fotográficos** y **no-fotográficos**. En el campo de la percepción remota, una palabra que sustituye bien el término radiómetro es el **sensor**. Se lo puede definir como el dispositivo capaz de detectar y registrar la radiación electromagnética en determinada banda del espectro electromagnético, así como de generar informaciones que pueden transformarse en un producto pasible de interpretación, sea en forma de imagen, de gráfico o de cualquier otro producto.

Los sistemas sensores están formados básicamente por una parte óptica (colector), constituida por lentes y espejos, que tiene por objetivo captar y dirigir la energía proveniente de los elementos hacia los detectores.

De acuerdo al nivel de recolección de la radiación, los sistemas sensores pueden ser: terrestre, suborbital y orbital.

El uso de sistemas sensores, a nivel terrestre o de suelo, para obtener datos de la radiación reflejada y/o emitida por los elementos de la superficie terrestre es, sin duda, muy importante para entender el comportamiento espectral de esos elementos. Por ejemplo, la radiometría de campo se usa mucho en los estudios que relacionan comportamiento espectral con anomalías de la planta provocadas por estrés, como ser deficiencia de nutrientes. También, se emplea mucho en investigaciones sobre estimación de parámetros biofísicos usados en modelos de crecimiento de cultivo, como es el caso del índice de área foliar.

Tomar las medidas a corta distancia y en pequeñas áreas de muestreo, permite que los resultados obtenidos retraten, con mayor fidelidad, aquello que se desea investigar (Epiphanio, 1989).

La percepción remota a nivel suborbital tiene como plataforma, generalmente, a las aeronaves tripuladas. En este caso, el sensor más importante, operacionalmente, es la cámara fotográfica. Además de las cámaras fotográficas, en las aeronaves se pueden instalar otros tipos de sensores como los espectrómetros de imágenes hiperespectrales (instrumentos con capacidad de obtener una imagen en varias bandas espectrales) y las cámaras de video.

En el nivel orbital están los sistemas sensores a bordo de satélites, que pueden tener diferentes configuraciones y operar en distintas bandas del espectro electromagnético.

A continuación, examinaremos más detalladamente, los sensores fotográficos y los orbitales.

Sensores fotográficos

Los sensores fotográficos están compuestos por un sistema óptico (conjunto de lentes) que registra la energía reflejada por los elementos de la superficie de la Tierra en una película fotosensible, o sea, el detector tradicionalmente llamado film fotográfico. En la percepción remota, los sistemas fotográficos más utilizados son las cámaras métricas. Con estos sistemas se obtienen las fotografías aéreas que pueden ser pancromáticas (blanco/negro) o en color (normal o falso-color), según se ilustra en la **Figura 5.5.**

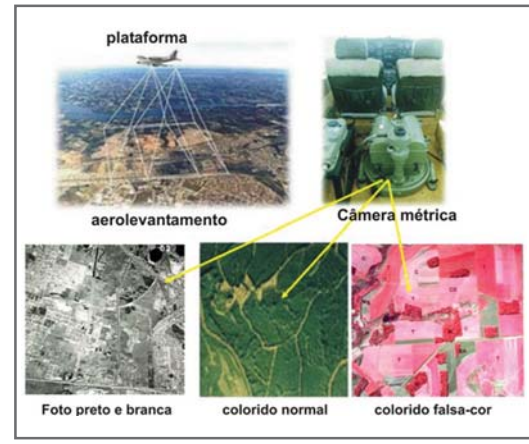


Figura 5.5: Sistema de aero-relevamiento y ejemplos de fotografías aéreas

La sensibilidad espectral de una película fotográfica oscila entre 350 nm (ultravioleta) y 900 nm (parte del infrarrojo cercano) y depende de la cantidad de radiación (tiempo de exposición del film a la luz) y no de la intensidad del flujo luminoso. En el caso de las películas fotográficas, la energía es acumulativa, pudiendo llegar a la saturación, denominada lúmica.

Sensores no fotográficos

Son sistemas cuyos detectores son uniones metálicas que sustituyen las películas fotográficas. La gran ventaja de estos sensores es que no es necesario sustituir el film como en las cámaras fotográficas. Normalmente, son categorizados en función de la región espectral en la que operan. Epiphânio (1989) comenta que esa categorización es necesaria, porque cada sensor tiene características ópticas y de detección propias. Por ejemplo, los detectores de silicio (Si) son sensibles a la radiación electromagnética en las bandas espectrales del visible y del infrarrojo cercano. Los detectores compuestos de indio y estaño (InSb) son solamente sensibles a la radiación electromagnética del infrarrojo medio. Y aquellos cuya composición contienen la combinación de los elementos químicos mercurio, cadmio y telurio (HgCdTe) se utilizan para medir la radiación en la región del térmico. Para la región de microondas, hay dos tipos básicos de instrumentos: los radares (activos) y los radiómetros de microondas (pasivos).

Cuando se trata de sensores no-fotográficos se deben tener en cuenta cuatro características muy importantes para interpretar los datos que ellos obtienen, denominadas dominios de resolución: i) espectral; ii) espacial o geométrica; iii) radiométrica; y iv) temporal. Para el analista de datos de satélites es muy importante entender bien la resolución espectral y la espacial.

La **resolución espectral** es definida en función del ancho de banda en que opera el sensor y de la región del espectro electromagnético. A modo de ejemplo, observe las curvas espectrales de la **Figura 5.6**, referentes a dos cultivares de trigo, denominados CV1 y CV2.

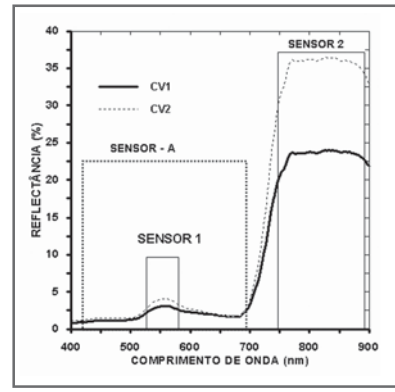


Figura 5.6: Comportamiento de dos cultivares de trigo.

Esas curvas espectrales son muy parecidas en la región del visible, excepto entre 500 y 600 nm (región del verde). Por otro lado, presentan diferencias marcadas en el infrarrojo cercano entre 700 y 900 nm. De esa forma, si se construye un dato sensor A, que opera en la banda espectral de 400 a 600 nm, muy probablemente no se podrán identificar esos cultivares de trigo en la imagen por él generada. Sin embargo, si otro sensor opera en la región espectral de 500 a 600 nm (sensor 1 de la **Figura 5.6**), la posibilidad de discriminar y mapear esos cultivares de trigo es mucho mayor, porque las curvas están más alejadas. Por lo tanto, se puede decir que el sensor 1, además

de tener resolución espectral mayor que el sensor A (la banda espectral es menor), opera en una banda donde los dos cultivares presentan mayor alejamiento de las curvas espectrales. En la región del infrarrojo cercano (700 a 900 nm) se observa que los comportamientos espectrales de los cultivares de trigo son diferentes. Ese hecho es interesante porque muestra que no siempre un sistema de mejor resolución espectral produce un resultado mejor, sino que depende del comportamiento del elemento.

La **resolución espacial** o **geométrica** es muy importante del punto de vista de la interpretación de imágenes de satélites. La resolución espacial de un sistema sensor se refiere al campo visual instantáneo (IFOV), o sea, el área vista por un determinado sensor sobre la superficie de la Tierra dentro de un ángulo sólido, en determinado instante de tiempo.

La radiación reflejada de los elementos dentro del IFOV es captada por el sistema sensor e integrada y trasmitida a una estación de rastreo como un único valor promedio.

Para el usuario de datos de la percepción remota, el IFOV muchas veces no tiene sentido, pues cuando se trata de imágenes de satélites, la preocupación del analista es el tamaño del píxel. En este sentido, se puede decir que la resolución espacial está íntimamente ligada al tamaño del píxel. De ese modo, el píxel representa el promedio de las energías reflejadas por los elementos en la superficie terrestre dentro de un IFOV. Así, cuanto menor sea el ángulo sólido, mayor será la resolución espacial del sensor y, consecuentemente, menor es el píxel. Para ejemplificar ese hecho, el **Cuadro 5.3** contiene algunos sistemas sensores con sus respectivas resoluciones espaciales.

Cuadro 5.3: Ejemplos de sensores y resolución espacial

Sensor/satélite	Longitud de onda
MSS/Landsat	80 x 80
TM/Landsat	30 x 30
CCD/CBERS	20 x 20
HRV/SPOT	20 x 20
Sensor/IKONOS	4 x 4
	1 x 1
Sensor/QuickBird	2,4 a 28
	0,61 z 0,76

En cuanto a la **resolución radiométrica**, si bien es una característica del sistema sensor, se refiere a la capacidad que los detectores presentan para poder identificar pequeñas diferencias de intensidades de la radiación proveniente de los elementos. En otras palabras, es la sensibilidad que posee un sensor para sentir pequeñas diferencias de la radiación reflejada en los elementos de la superficie terrestre. En general, cuando un sistema sensor presenta resolución radiométrica alta, los datos se graban con mayor número de bits. Por ejemplo, los datos obtenidos por el sensor a bordo del satélite IKONOS se graban en 12 bits. Entonces, la resolución radiométrica es una característica del sensor.

Por otra parte, la **resolución temporal** es una característica de la plataforma que carga el sensor, que en este caso son los satélites. Por ejemplo, el satélite Landsat 5 demora 16 días en pasar nuevamente por un área, que comúnmente se denomina período de revisita. La revisita del satélite SPOT es de 26 días.

Hay casos en que un satélite lleva a bordo sistemas sensores con resoluciones espaciales diferentes, como es el caso del satélite CBERS, que lleva a bordo tres sistemas sensores: el CCD (Couple Charged Device), el WFI (Wide Field Imager) y el IR-MSS (Infrared Multispectral Scanner) que presentan resoluciones temporales y espaciales diferentes. El sensor WFI presenta una resolución espacial de 250 m x 250 m, banda de generación de imágenes de 900 km y resolución temporal de 5 días. En cambio, los otros dos sensores (CCD y IR-MSS), presentan resoluciones espaciales mayores (20 m y 80m respectivamente) y bandas de generación de imágenes menores (120 y 113 km). Para esos dos sensores la resolución temporal es de 26 días.

En general, la resolución temporal de un dato sensor está íntimamente ligada al tamaño de escena de la imagen.

USO DE DATOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA EN LOS SISTEMAS AGRÍCOLAS

La agricultura es una actividad económica con gran dependencia de innumerables factores químicos, físicos, fisiológicos tanto de la planta como del suelo y del microclima donde se desarrolla el cultivo. Por ello, puede sufrir consecuencias en todas las etapas productivas.

Lo más esperado por todo productor, durante el ciclo de los cultivos agrícolas, sucede precisamente a último momento, es decir, durante la cosecha, momento en que sabrá cuánto produjo y el rendimiento del cultivo.

Frente a tantos parámetros que pueden influenciar esta información final, sería muy sutil pensar que un terreno puede ser totalmente homogéneo. La heterogeneidad, o variabilidad espacial de la productividad del cultivo, dentro de un área de producción agrícola, es real. Esta variabilidad se puede conocer de dos formas: por medio de informaciones indirectas de fertilidad del suelo o por mapeo de la fertilidad. Los métodos empleados pueden ser directos, datos obtenidos en el campo, o indirectos, a través de datos obtenidos remotamente. A continuación se muestran algunos ejemplos de aplicación de datos remotamente percibidos (terrestres, suborbital y orbital) en la agricultura de precisión.

Datos de sensores terrestres

Los datos obtenidos por sensores terrestres se utilizan mayormente en investigaciones básicas, es decir, se emplean estos datos para estudiar las relaciones biofísicas de los cultivos agrícolas sometidos a algún tipo de estrés (nutricional, térmico o hídrico), con el comportamiento espectral y en determinadas bandas del espectro electromagnético. En la **Figura 5.7** se muestran algunos equipos utilizados para medir la radiación reflejada o emitida de doseles agrícolas a nivel de campo.

De acuerdo con Henderson y Badhwar (1984), la espectro-radiometría de campo es una técnica de percepción remota que se puede utilizar en experimentos agronómicos para obtención de medidas de la energía reflejada y en diferentes bandas de longitud de onda del espectro electromagnético, con el fin de establecer relaciones entre esta energía y algunos parámetros biofísicos de la vegetación. De acuerdo con estos autores, la gran ventaja de la percepción remota es que tales medidas pueden ser tomadas, tanto cerca de la superficie, en pequeñas áreas, como del espacio aéreo, para observar grandes regiones detalladamente.

Figura 5.7: Sensores utilizados a nivel de campo para medir la radiación reflejada o emitida de doseles agrícolas: sensor cuántico (1), Spectron SE-590 (2), LAI-2000 (3 y 4), Thermopoint (5) y 0 FieldSpec PRO FR (6).

Daughtry et al. (1992) comentaron que en las plantas sanas, adecuadamente provistas de agua y nutrientes, la producción líquida de fotosíntesis y de fitomasa es proporcional a la cantidad de energía absorbida. Sin embargo, en las condiciones de campo, raramente se tiene un cultivo agrícola donde todos los campos cultivados presentan uniformidad de nutrientes y de agua en el suelo. Por lo tanto, el desarrollo de las plantas en los diferentes lotes casi siempre es heterogéneo y, seguramente, las relaciones biofísicas y agronómicas relatadas por Daugthry et al. (1992) serán influenciadas.

A nivel de campo, las investigaciones se realizan según dos abordajes, a saber: a) aquellas que buscan establecer relaciones directas entre la reflectancia espectral y la producción de fitomasa (Tucker et al., 1985); y b) aquellas que buscan estimar la fracción de la energía solar incidente que es absorbida por el dosel del cultivo (APAR) y así relacionarla con la fitomasa y/o granos (Asrar et al., 1984; Gallo et al., 1985; Wiegand y Richardson, 1986; Moreira, 1997; Rudorff et al., 1997; Oveido y Rudorff, 2000).

En general, los datos obtenidos en el campo se transforman en índices de vegetación (IVs) y, luego, buscan la relación de esos índices con los parámetros agronómicos de los cultivos, como ser: índice de área foliar (IAF), productividad, fitomasa, etc. En la literatura se encuentran varios índices de vegetación. La base física de los IVs se atribuye a la alta absorción de la radiación por la clorofila y a su diseminación por las hojas, en las regiones espectrales del rojo (R) y del infrarrojo cercano (IRC), respectivamente (Gates et al, 1965). Entre los IVs usualmente utilizados, se destacan el Simple Ratio-SR (Gates et al, 1965) y el Normalized Difference Vegetation Index-NDVI (Rouse et al., 1974), siendo ampliamente utilizados en la estimación de biomasa, en la estimación del índice de área foliar, de la radiación fotosintéticamente activa absorbida y de la productividad. Para minimizar el efecto de las variaciones de brillo del suelo ("background"), Huete (1988) desarrolló el Soil-Adjusted Vegetation Index-SAVI. Estos IVs son sensibles, de manera distinta, a las variaciones de la respuesta espectral en las bandas del rojo e infrarrojo-cercano, de acuerdo con la forma en que se calculan estos índices (**Cuadro 5.4**).

Cuadro 5.4: Índices de vegetación y ecuaciones matemáticas

Índice de Vegetación	Fórmula matemática
RS	$RS = \frac{IRC}{R}$
NDVI	$NDVI = \frac{(IRC - R)}{(IRC + R)}$
SAVI	$\frac{IRC - R}{(IRC + R + L)*(1 + L)}$, $L = 0,5$

Asrar et al. (1984), mostraron que existe una buena correlación entre los valores del NDVI y la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida (***f***A) y establecieron un modelo para el cultivo del trigo, según la siguiente ecuación:

$$fA = -0,109 + 1,253\ NDVI$$

Rudorff et al. (2003), utilizando espectro-radiometría de campo para obtener medidas del factor de reflectancia del cultivo de maíz, observaron que NDVI se correlaciona bien con el IAF, si bien ninguno de ellos se correlacionó con la productividad de granos, lo que puede ser atribuido, en parte, al alto nivel de productividad obtenida, entre 5 y 10 t/ha. En esta situación es probable que se haya producido una saturación del NDVI en función del elevado IAF.

Datos de sensores aerotransportados

A nivel suborbital la recolección de datos tiene como plataforma las aeronaves tripuladas. Entre los principales equipos sensores aerotransportados, existen las cámaras fotográficas, los generadores de imágenes (scanner), las cámaras de video y los radares. Operativamente, el sensor más importante es la cámara fotográfica, que obtiene datos de alta calidad, en una banda del espectro electromagnético que va de 350 a 900 nm.

Debido a los altos costos de los aero-relevamientos, de las restricciones legales para fotografiar un área determinada y de la evolución de las videocámaras, hoy día, se ha tratado de sustituir las fotografías aéreas por imágenes videográficas que, además de menor costo, proporcionan datos de alta calidad y sin restricciones, como las fotografías. En la **Figura 5.8** se muestra una imagen videográfica y un detalle de un área urbana.

La utilización de fotos aéreas para la estimación del índice de materia orgánica fue testeada por Blackmer y Schepers (1996). En la búsqueda de posibles soluciones para controlar la aplicación localizada de nitrógeno, los autores analizaron fotos aéreas del suelo, antes y después de una plantación de maíz. Trabajos semejantes fueron dirigidos anteriormente por Kvien et al. (1995) en cultivos de algodón y maní y por Heege y Reusch (1996) en trigo. Estos últimos, alertaron sobre el hecho de que el método de medición de la demanda de nitrógeno por la reflectancia de las hojas presupone buena correlación entre los dos factores. Sin embargo, la reflectancia del dosel puede verse afectada por otras deficiencias o, incluso, enfermedades.

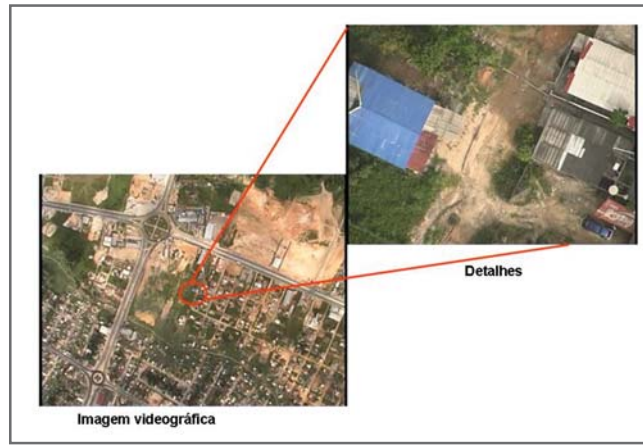


Figura 5.8: Imagen videográfica de un área urbana y el detalle de una construcción.

En el artículo publicado por Taylor et al. (1997a), los autores analizaron la utilización de fotografías aéreas para el cálculo del NDVI (índice obtenido por causa de la reflectancia en las bandas del visible y del infrarrojo cercano), a fin de identificar la variabilidad en el cultivo. En otro trabajo de Taylor et al. (1997b), se demostró la potencialidad de utilización de fotografías aéreas para estimar la productividad. Los resultados mostraron buenas correlaciones (r^2 = 0,775) entre el NDVI, obtenido por fotografías aéreas y el peso de grano por unidad de área (parámetro de la planta medido en el campo).

Datos de sensores orbitales

En la agricultura convencional, en muchos cultivos se han utilizado datos obtenidos por sensores orbitales, para monitorear y mapear áreas agrícolas y se ha demostrado, comprobadamente, el gran potencial de esas imágenes. En relación a las fotografías aéreas, las imágenes de satélites presentan la ventaja de: a) ser repetitivas, es decir, periódicamente el satélite pasa sobre el área de interés y, no habiendo incidencia de nubes en la región, es posible obtener una imagen en cada pasaje; b) las imágenes son de bajo costo, comparado con el aero-relevamiento; c) las imágenes ofrecen una amplia visión de la región en estudio; y d) la interpretación de imágenes de satélites está fundamentada en el criterio espectral.

En la agricultura de precisión, las técnicas de manejo se aplican en una escala mucho más detallada, o sea, el terreno agrícola se fragmenta en pequeñas áreas que, en el contexto de producción, forman unidades individuales. En ese caso, el uso de imágenes de satélites de baja y mediana resolución espacial, tiene el inconveniente de presentar resolución espacial mucho mayor que el de aquellas consideradas en el manejo del área. Se entiende por resolución espacial el área menor "vista" por esos sensores, que en las imágenes se denomina píxel (del inglés, picture elements). En los sensores de mediana resolución espacial, los píxeles de las imágenes son en promedio de 20m x 20m, o sea, un área de 400 m^2. Por ejemplo, una imagen del sensor TM del Landsat-5 presenta un píxel de 30m x 30m (900 m^2).

Uno de los aspectos de gran importancia en AP es la determinación de zonas homogéneas de manejo. Sólo a partir de esta zonificación se puede tener una idea clara de los matices del terreno y, consecuentemente, de las necesidades de cada punto del campo de cultivo. En este sentido, la aparición de satélites de alta resolución espacial y de satélites con sensores hiperespectrales

presenta una perspectiva altamente promisoria de la utilización de tecnología de teledetección en agricultura de precisión, puesto que la mayoría de las técnicas utilizadas en este sistema requiere imágenes con alto nivel de detalle. Sin embargo, los problemas encontrados actualmente en el uso de datos obtenidos por estos sensores son el elevado costo de adquisición de estas imágenes y la pequeña área de cobertura de los satélites de alta resolución (11 x 11 km, Ikonos 16 x16 km Quickbird, 60 x 60 km Spot5, por ejemplo).

Según varios trabajos existentes en la literatura, las características físicas, como los tenores de materia orgánica, textura, permeabilidad de los diferentes tipos de suelos, pueden estar correlacionadas con la respuesta espectral registrada en imágenes provenientes de sensores remotos. Se extrajeron informaciones de la superficie reflectante para estudiar la variabilidad de la textura del suelo (King et al., 1995), la materia orgánica del suelo (Robert, 1993; Zheng y Schreier, 1988), el contenido de carbonato de calcio en el suelo (Leone et al., 1995) y los nutrientes del suelo (Thompson y Robert, 1995). Además, se utilizaron informaciones sobre la temperatura del suelo (derivadas de los datos obtenidos por sensores que operan en la región del térmico), para estudiar las variaciones en el contenido de humedad del suelo (Idso et al., 1975) y en la compactación del suelo (Burrough et al., 1985).

Asimismo, con los datos obtenidos por el Landsat, Machado et al. (2002), utilizando el procesamiento digital de imágenes, observaron el potencial de la metodología en la caracterización de la variabilidad espacial de la biomasa de la caña de azúcar, en la ayuda al proceso de estimación de la producción y en el direccionamiento del muestreo y observaciones de campo. De manera general, los autores observaron, que la utilización de esta metodología, comparándola con la tradicional, proporcionó una mejor estimación, o bien disminuyó el margen de error de 4% a 2%.

Yang et al. (2001) presentaron sugerencias para integrar imágenes multiespectrales, observaciones de campo, GPS, SIG, procesamiento de imágenes y monitoreo de recolección para mapeo de variabilidad espacial en crecimiento y rendimiento de cultivos. Para ello, se correlacionaron datos de rendimiento de algodón, sorgo y maíz con imágenes en tres bandas espectrales y cuatro índices de vegetación obtenidos en 29 puntos de muestreo. En esta investigación, los autores obtuvieron valores del coeficiente de correlación (r^2), en el rendimiento de cada cultivo en función de la banda espectral o de un índice de vegetación. Las mejores ecuaciones con valores de $r^2 = 0.57$, 0.59 y 0.76 fueron para el algodón, el sorgo y el maíz, respectivamente. Los autores sugieren que imágenes obtenidas alrededor del estado vegetativo máximo o durante el comienzo del llenado de granos, describen mejor el rendimiento esperado o la variabilidad de rendimiento.

Rydberg y Söderström (2000), analizaron el potencial de imágenes multiespectrales obtenidas por el satélite SPOT para distinguir variaciones espaciales de patrones de crecimiento de algunos cultivos (canola, trigo, cebada, arroz, avena y centeno). En esa investigación los autores compararon clasificaciones temáticas de mapas de rendimiento obtenidos en campo con clasificaciones temáticas de mapas de rendimiento obtenidos a través de la aplicación del NDVI en las imágenes SPOT. Los autores observaron altas correlaciones cuando el cultivo se encontraba en la fase de llenado de granos. Las mayores correlaciones se observaron en los cultivos de trigo ($r^2 = 0.65$) y cebada ($r^2 = 0.77$). Los autores comentaron que el mapeo de rendimiento de los cultivos en imagen NDVI, originada por una imagen SPOT, puede proporcionar un fuerte indicador de dónde se pueden encontrar las altas variabilidades del campo y que esta información se puede utilizar como soporte de posicionamiento de muestreo de suelo y de toma de decisiones en el manejo de la propiedad.

REFERENCIAS

Asrar, G.; Fuchs, M.; Kanemasu, E.T. y Hatfield, J.L. 1984. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. Agronomy Journal, v. 76, n. 2, p. 300-6.

Blackmer, T. y Schepers, J.S. 1996. Using DGPS to improve corn production and water quality. GPS World, Eugene, p.44-52, março 1996.

Bowker, D.E.; Davis, R.E.; Myrik, D.L. y Jones, W.J. 1985. Spectral reflectances of natural targets for use in remote sensing studies. [S.l.]: National Aeronautics and Space Administration, NASA. 184 p. (Reference Publication, 1139).

Burrough, P.A.; Bregt, A.K.; de Heus, M.J. y Kloosterman, E.G. 1985. Complementary use of thermal imagery and spectral analysis of soil properties and wheat yields to reveal cyclic patterns in the Flevopolders. Journal of Soil Science, v. 36, p. 141-152.

Daughtry, C.S.T.; Gallo, K.P.; Goward, S.N.; Prince, S.D. y Kustas, W.P. 1992. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. Remote Sensing of Environment, v. 39, n. 2, p. 141-52.

Epiphânio, J.C.N. 1989. Metodologia de aquisição de dados ao nível terrestre. In: Assunção, G.V. Sensoriamento remoto na agricultura: Conceitos básicos, metodologia y aplicações. São José dos Campos, SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE abril 1989. p. 53-73. (INPE-4806-MD/39).

Epiphânio, J.C.N.; Formaggio, A.R.; Valeriano, M.M. y Oliveira, J.B. 1992. Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo. São José dos Campos, SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, junho de 1992. 132 p. (INPE-5424-PRP/172).

Gallo, K.P.; Daughtry, C.S.T. y Bauer, M.F. 1985. Spectral estimation in corn canopies. Agronomy Journal, v. 78, n. 5, p. 752-56.

Gates, D.M.; Keegan, H.J.; Chleter, J.C. y Weidner, V.R. 1965. Spectral properties of plants. Applied Optics, v. 4, n. 1, p. 11-20.

Halliday, D. y Resnick, R. 1968. Física, parte II. Rio de Janeiro. Livro técnico, 1440 p. Cap. 27, 33,39-46.

Heege, H.J. y Reusch, S. 1996. Sensor for on the go control of site specific nitrogen top dressing. St. Joseph, ASAE Paper No. 96-1018, 14p.

Henderson, K.E. y Badhwar, G.D. 1984. An initial model for estimating soybean development stages from spectral data. Remote Sensing of Environment. 14:55-63

Huete, A.R. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). Remote Sensing of Environment, 25, p.295-309.

Idso, S.B; Schmugge, T.J.; Jackson, R.D. y Reginato, R.J. 1975. The utility of surface temperature measurements for the remote sensing of surface soil water status. J. Geophys. Res., v. 80, p. 3044-3049.

King, B.A.; Brady, R.A.; McCann, I.R. y Stark, J.C. 1995. Variable rate water application through sprinkler irrigation. In: Proc. Site-Specific Management. For Agricultural Systems, Minneapolis, 1994. Anals. Madison: ASA-CSSA-SSSA, p. 485-493.

Kvien, C.; Waters, D. y Usery, L. 1995. Farming in the information age. GPS World, supplement "Precision Farming", Eugene, p.10-19, December 1995

Leone, A.P.; Wright, G.G. y Corves, C. 1995. The application of satellite remote sensing for soil studies in upland areas of Southern Italy. Int. J. Remote Sensing, v. 16, p. 1087-1105.

Machado, H.M.; Lamparelli, R.A.C; Rocha, J.V.; Zullo J.Jr. y Pereira, V.H. 2002. Utilização de dados orbitais (Landsat 7) e Sistema de Informações Geográfica (SIG) na estimativa do potencial de produção da cana-de-açúcar. 2º Simpósio Internacional de Agricultura de Precisão, Anais. Viçosa, MG, 12 a 14 de junho de 2002.

Moreira, M.A. 1997. Déficit hídrico na cultura do trigo e o impacto na resposta espectral e em parâmetros agronômicos. Piracicaba, SP: 1997. 142 f. (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura " Luiz de Queiroz"/USP, Piracicaba. O sol [online]. <http://www.achetudoeregiao.com.br/Astronomia/SOL_2.HTM> jun. 2005.

Oviedo, A.F.P. y Rudorff, B.F.T. 2000. Índice de Área Foliar e resposta espectral da cultura do trigo (Triticum aestivum L.) submetida ao estresse hídrico. Revista Biociência, Taubaté, v.6, n.2, p.39-47, jul-dez, 2000.

Parada, A.A. y Chiquetto, M.J. 1992. Física. São José dos Campos: Scipione, v.2.

Steffen, C.A. 1996. Técnicas radiométricas côn el SPECTRON SE-590. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8, Salvador. Anais. São José dos Campos, SP: INPE, 1996. v. 1, p. 9-14.

Robert, P. 1993. Characterization of soil conditions at the field level for soil specific management. Geoderma, v. 60, p. 57-72.

Rouse, J.W.Jr.; Haas, R.H.; Deering, D.W.; Schell, J.A. y Harlan, J.C. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation, NASA/GSFC type III final report: Greenbelt, Maryland, NASA, 371 p.

Rudorff, B.F.T.; Moreira, M.A.; Oviedo, A. y de Freitas, J.G. 1997. Efeito do nitrogênio e do déficit hídrico na resposta espectral de cultivares de trigo. CD-ROM. Simp. Latino-Americano de Percepção Remota, Mérida, Venezuela: SELPER, v.1.p.1-9.

Rudorff, B.F.T.; Moreira, M.A.; Adami, M. y de Freitas, J.G. 2003. Resposta espectral do milho e sua relação com altos níveis de produtividade de grãos Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, 05 - 10 abril 2003, INPE, p. 2597 - 2603.

Rydberg, A. y Söderström, M. 2000. Potential crop growth assessment from remotely sensed images compared to ordinary yield maps. Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture. ASA-CSSA-SSSA, 677 South Segoe Road, Madison, WI 53711, USA.

Taylor, J.C.; Thomas, G. y Wood, G.A. 1997a. Diagnosing sources of within-field variation with remote sensing. In: Precision Agriculture'97. Annals V.2, p. 705-712.

Taylor, J.C.; Thomas, G. y Wood, G. A. 1997b. Mapping yield potential with remote sensing. In: Precision Agriculture'97 Annals V.2, p. 713-720.

Thompson, W. y Robert, P.C. 1995. Valuation of mapping strategies for variable rate applications. In: Proc. Site-Specific Management. For Agricultural Systems, Minneapolis, 1994. Annals. Madison: ASA-CSSA-SSSA, p. 303-323.

Tucker, C.L.; Vanpraet, C.; Sharman, M.L. y Van Ittersum, G. 1985. Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in Senegalese Sahel: 1980-1984. Remote Sensing of Environment, 17(3):233-49, Jun. 1985.

Zheng, F. y Schreider, H. 1988. Quantification of soil patterns and field soil fertility using spectral reflection and digital processing of aerial photographs. Fertilizer Res., v. 16, p. 15-30.

Wiegand, C.L.; Richardson, A.J.; Jackson, R.D.; Pinter Jr.P.J.; Aase, J.K.; Smika, D. E.; Lautenschlager, L.F. y McMurtrey III, J.E. 1986. Development of agro meteorological crop model inputs from remotely sensed information. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. GE-24, n. 1, p. 90-98, Jan. 1986.

Yang, C.; Bradford, J.M. y Wiegand, C.L. 2001. Airborne Multispectral imagery for mapping variable growing conditions and yields of cotton, grain sorghum, and corn. Transactions of the ASAE v. 44, n.6, p.1983-1994.

CAPÍTULO 6

TECNOLOGÍA DE DOSIS VARIABLE

6.1. TECNOLOGÍA DE MANEJO DE DOSIS VARIABLE

Mario Bragachini; Andrés Méndez; Fernando Scaramuzza; María Celeste Gregoret y FedericoProietti.
bragach@correo.inta.gov.ar; andresmendez74@hotmail.com; ferscara@hotmail.com; agprecision@correo.inta.gov.ar
Proyecto Agricultura de Precisión www.agriculturadeprecision.org
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Argentina

INTRODUCCIÓN

En la primera etapa de introducción a la Agricultura de Precisión en EE.UU., allá por los años 1991-1993, se diseñó un esquema de utilización de las herramientas posicionadas por DGPS que terminaba indefectiblemente en una aplicación de insumos en forma variable (VRT) con DGPS como única alternativa que disponía el productor para la inversión.

En la actualidad, se sabe un poco más acerca del aprovechamiento agronómico de los datos de rendimiento grabados espacialmente (mapas de rendimiento). Anteriormente, se decía que el comienzo de la Agricultura de Precisión partía del análisis de los primeros mapas de rendimiento logrado. Luego de años de trabajo, evolución y experiencia se sabe que la variabilidad expresada en el rendimiento de un cultivo en forma espacial depende de una diversidad de factores y que su análisis e interpretación es una tarea compleja, resultando muy difícil extraer conclusiones directas para un manejo de insumos de sitios específicos (Site specific crop management, SSCM).

Actualmente, se sigue avanzando en los conocimientos agronómicos, en la puesta a punto de las herramientas de cosecha de datos georeferenciados, en el diseño de los ensayos, en el desarrollo de nuevas herramientas –como los sensores remotos de tiempo real–, la percepción remota que aportará importantes adelantos tecnológicos en cuanto a imágenes digitalizadas georeferenciadas. También y por otro camino paralelo, se están mejorando la precisión y la facilidad de utilización, así como la reducción de los costos de todo el equipamiento necesario para, ya en el campo y con el mapa de prescripción de aplicación de insumo realizado, equipar un tractor con una fertilizadora, sembradora o pulverizadora, para realizar –en forma eficiente– la aplicación de insumos variable de acuerdo a la real necesidad de cada sitio del lote. La idea es relativamente simple: maximizar la producción y minimizar los costos.

En ejemplo, Argentina presenta características particulares de sistemas de producción que se diferencian de otros países con mayores antecedentes de agricultura, como EE.UU. y los países europeos de la comunidad. En estos países, y debido a los fuertes subsidios recibidos durante muchos años, poseen un esquema productivo de maximización de rendimientos físicos de los cultivos sin una relación insumo-producto lógica. Por ello, el productor y asesor optan por una aplicación de semillas, fertilizantes, herbicidas y pesticidas que les asegure el máximo rendimiento en kg/ha para las condiciones ideales. Utilizando ese criterio se desperdician insumos en determinadas áreas del lote que no pueden alcanzar el objetivo o que las características físico/químicas del suelo lo impiden o por cualquier otro motivo como el relieve, infestación de malezas o enfermedades, historia del lote, etc.

La idea fundamental en que se basa la Agricultura de Precisión es que se deben aplicar los insumos en cantidades que se puedan aprovechar en su totalidad, y que cada área del lote exprese su máximo potencial económicamente posible. Según esto, ahorraríamos insumos en las áreas de bajo rendimiento potencial sin disminuir el rendimiento (que era bajo), para trasladarlo a las áreas de mayor potencialidad, que sí pueden aumentar la producción aprovechando los insumos correctamente.

En otras situaciones de variabilidad, la dosis de fertilizante promedio puede ser insuficiente para un área degradada químicamente y resulta conveniente aplicar más en ese sitio de mayor

respuesta. En resumen, sería cambiar la metodología de aplicación de insumos, bajo la suposición que los lotes presentan potenciales de rendimiento homogéneos en todo el área, por otra de mayor exactitud de aprovechamiento de los insumos, basada en el conocimiento de la variabilidad de respuesta dentro del lote, que permita maximizar la respuesta económica en cada sitio del mismo.

Las herramientas tecnológicas que aporta la Agricultura de Precisión a la cosecha de datos, facilita la cuantificación de la variabilidad natural de un lote. Además, mediante ensayos debidamente programados en el gran cultivo, nos aporta datos de respuesta variable a la aplicación de insumos. Si esos datos son debidamente interpretados y apoyados por un muestreo de suelo por sitios homogéneos guiado y debidamente posicionado, aportarán claridad en la toma de decisiones a la aplicación variable de insumos. Existen en el mercado diversas herramientas para medir caracteres específicos, con el objetivo de dejar de utilizar dosis uniformes y pasar a dosis variable, pero para ello, se deben tener en cuenta ciertos parámetros para evitar errores.

DOSIS VARIABLE

Una de las herramientas que interesa a asesores y productores, en particular, es la dosis variable, que actualmente apunta a mejorar el manejo de los insumos, lo que dependerá del cultivo y del fertilizante que se utilice. Ejemplo de esto son los ensayos que buscan curvas de respuesta a la fertilización, que se realizan con nitrógeno y en gramíneas (maíz y trigo básicamente). Por ello, variar la dosis en estos cultivos y con éxito va a depender de los conocimientos que tengamos sobre rendimientos en los diferentes ambientes, el porcentaje de variabilidad del lote y del objetivo que persiga el asesor o productor. Algunos buscan obtener respuesta agronómica (en vez de una respuesta meramente económica) porque son dueños del campo y desean aportar rastrojos de calidad mediante el mayor aporte de fertilizantes (mejorando la relación C/N), obteniendo de esta manera el máximo rendimiento.

Cuando se busca solamente rentabilidad, ésta no siempre es la mejor opción para el suelo. Habría que tener en cuenta que la dosis variable se debería hacer con datos precisos de rendimiento, recomendación y sabiendo si se quiere lograr un resultado agronómico o económico. Hacer dosis variable sin tener en claro un objetivo podría llevar al fracaso de la tecnología.

En el caso que haya variabilidad de rendimientos en el campo, es posible conocer la superficie que ocupa el sitio con mayor o menor potencialidad de rendimiento y se puede caracterizar por medio de análisis físicos o químicos de suelo. Luego comienza el proceso de saber qué dosis de fertilización recomendar, por ejemplo, y existen varias maneras de realizar recomendaciones. Una de ellas, es el método del balance (que es simple pero más impreciso si varían mucho las condiciones de los ambientes), o haciendo correr modelos de simulación para cada sitio (que le da más precisión al dato). Luego, se aplica la cantidad de fertilizante que los modelos indiquen con la maquinaria de dosis variable y en cada sitio específico. El objetivo es apuntar a un manejo más eficiente de los insumos, dejando de lado la dosis uniforme. Por ejemplo, donde hay recomendaciones zonales de aplicar 100 kg de nitrógeno/ha para el cultivo de maíz, ahora se puede determinar en qué parte del lote se fertilizará con 30 o 150 kg de N/ha y, de esta manera, se maneja la variabilidad del campo, "muchas personas hacen dosis variable aplicando menos fertilizante en algún lugar y más en otro, sin tener datos precisos sobre el potencial de rendimiento del cultivo y lo que puede aportar el suelo al cultivo. Es decir, que realizan dosis variable de manera imprecisa".

Existen muchos campos o lotes con escasa variabilidad (del 20%, por ejemplo) y que se encuentran en ambientes difíciles de caracterizar, debido que dicha variabilidad no se debe a la génesis de suelo sino a condiciones ambientales (años húmedos o secos). En esos casos, si los productores

aplican dosis uniformes pero están muy bien ajustadas, porque realizan muestreos de suelo, conocen los rendimientos potenciales de los lotes y manejan bien la información de pronósticos climáticos y regímenes de lluvia, es muy difícil conseguir resultados positivos, desde el punto de vista económico, por medio de la dosis variable.

Por otro lado, en lotes con alta variabilidad de rendimiento y grandes diferencias en las características del suelo, la dosis variable seguramente arrojará resultados positivos. En el caso de que el rendimiento del cultivo de maíz en la zona de bajo potencial sea de 3 t/ha y 14 t/ha en la de alto potencial, seguramente se noten las diferencias entre aplicar una dosis de 140 kg de N/ha o no aplicar fertilizante para otra zona. No ocurre lo mismo con la predicción del rendimiento del trigo en cuanto al planteo de fertilización en la zona Centro Norte de Córdoba (zona semi-árida). Este normalmente, se basa en el agua acumulada en el perfil del suelo, debido a que la probabilidad de lluvias es escasa durante otoño-invierno. Es decir, que si hay una zona donde el agua útil almacenada a 2 m es de 150 mm y otra de 350 mm y la conversión está cercana a 10 kg de trigo/mm de agua, se podría esperar aproximadamente un rendimiento de 1.500 kg/ha de trigo en un sitio y de 3.500 kg/ha en el otro. De esta manera, se hará el diagrama de fertilización en base a esos rendimientos y teniendo en cuenta los nutrientes que le puede aportar el suelo al cultivo.

Hay otras herramientas que se están utilizando para determinar zonas y relacionar rendimientos con índice verde, tales como la fotografía aérea e imágenes satelitales.

Pasos a seguir para llegar a buenos resultados en dosis variable de semilla y fertilizantes:

Contar con información georeferenciada es un paso importante en la aplicación variable de insumos, nos permite determinar la variabilidad presente en el lote. Para ello, existen diferentes herramientas que nos pueden llevar a una mejor definición de los ambientes homogéneos presentes en un lote, tales como; carta de suelos, fotografías aéreas, imágenes satelitales, entre otras. Una de las herramientas más destacadas es el mapa de rendimiento, debido a que el mismo, nos permite saber, no solo la variabilidad presente en el lote, sino también su cuantificación. En forma metafórica, es como una radiografía del lote. Esta información tan valiosa se puede conseguir mediante un monitor de rendimientos montado en una cosechadora y el mismo conectado a un GPS.

La **Figura 6.1** nos muestra un mapa de rendimiento en donde se pueden ver claramente los diferentes potenciales de rendimientos en ambientes homogéneos dentro del lote.

Con la información en mano, se procede a realizar una constatación a campo de la veracidad de estos ambientes y se procede a la toma de muestras en forma dirigida, mediante un GPS, en los que presumimos van a ser ambientes con diferente potencial. Las muestras, posterior a la extracción, son acondicionadas y trasladadas a un laboratorio de confianza para la determinación de un análisis lo más completo posible (**Figura 6.2**).

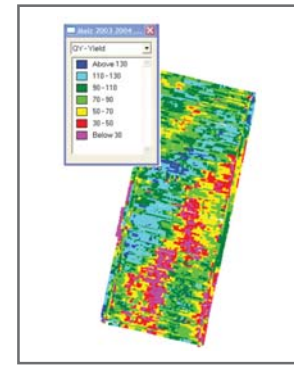


Figura 6.1: Mapa de rendimiento de maíz.

Con los resultados, quedaríamos en condiciones de realizar la determinación de los ambientes a tratar en forma diferencial según su potencial (**Figura 6.3**).

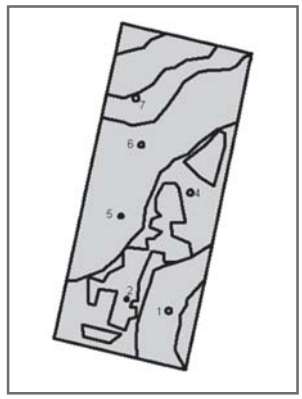


Figura 6.2: Puntos de muestreo

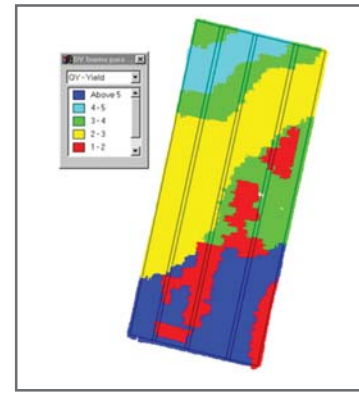


Figura 6.3: Ambientes con diferente potencial y franjas testigos de dosis uniforme.

Finalmente, se nos presenta una de las partes más importante y quizás más difíciles de realizar, la recomendación en cada zona en particular. De esto va depender, en gran parte, el éxito de la dosis variable (además de lo mencionado anteriormente).

A modo de ejemplo se muestra, en el **Cuadro 6.1**, un ensayo practicado en la zona de Pampayasta Córdoba, Argentina.

Cuadro 6.1: Dosis de fertilizante y densidad de siembra de cada Zona de Manejo.

Zonas de manejo:		1	2	3	4	5
	Sup (ha)	7,2	15,2	9,3	3,6	9,6
	Sup (%)	0,16	0,34	0,21	0,08	0,21
Potencial del Rto estimado (kg/ha)		3.000	9.500	5.000	8.000	7.500
Tratamientos	**Insumo**					
Dosis variables	Urea (kg/ha)	0	190	0	95	60
	Semilla (semillas/ha)	40.000	85.000	60.000	75.000	75.000
	PMA (kg/ha)	0	50	50	50	50
Dosis fija	Urea (kg/ha)			100		
	Semilla (semillas/ha)			80.000		
	PMA (kg/ha)			80		

Los tratamientos consistieron en franjas transversales cruzando la variabilidad del lote, uno con la dosis de nitrógeno y densidad de siembra ajustados según el potencial de rendimiento esperado en cada zona (dosis variable), y un testigo, con la dosis de fertilizante y densidad de siembra que usualmente aplica el productor, constante a los largo del lote (dosis uniforme). Ver **Figura 6.3**, zonas de manejo.

Con el mapa de rendimiento obtenido del ensayo, se calcularon las diferencias (dosis variable – dosis fija) entre los presupuestos parciales. De sus resultados se observó, que salvo en la zona 4, en el resto de las zonas el resultado fue positivo para la dosis variable. La zona 1, que era la zona de menor potencial de rendimiento, si bien tuvo un ingreso negativo, o sea menor en la dosis variable que en la fija, la diferencia en los costos también fue negativa (menor en la dosis variable), por lo que el resultado final de la zona fue positivo. El resultado negativo en la zona 4 se debió a que el ahorro en los costos por realizar dosis variable no compensó la disminución en el ingreso por un menor rendimiento.

A partir de este trabajo se pudo concluir que:

- La utilización de dosis variable según zona de manejo aumentó el margen económico;
- Los resultados positivos se debieron en mayor medida a una disminución de los costos en la dosis variable, más que a un mayor ingreso por aumentar el rendimiento, lo que implica un manejo más eficiente de los recursos, desde el punto de vista económico;
- El mayor aporte lo hizo la zona de menor potencial de rendimiento, ya que en ésta el impacto de disminuir la cantidad de insumos en relación a la dosis fija provocó un importante ahorro en los costos, lo que generó un resultado positivo significativo a favor de la dosis variable;
- El manejo agronómico del recurso suelo no está contemplado en este trabajo, dado que se estaría desfavoreciendo en cuanto al manejo a las zonas que tienen problemas de sodio, en vez de estar tratando de mejorar esa condición adversa; y
- El software, motores hidráulicos, sensores y monitor fueron desarrollados en Argentina, siendo este único en el mundo.

Sumado a esto podemos destacar el buen funcionamiento de todo el sistema, copiando la prescripción con un error mínimo (6 metros promedio) para las áreas homogéneas tratadas.

6.2. TECNOLOGÍA DE RIEGO VARIABLE

Stanley Best
sbest@inia.cl
Instituto de Investigaciones Agropecuaria (INIA), Chile

INTRODUCCIÓN

La alta variabilidad espacial en las condiciones físicas del suelo se traducen en una desuniformidad de agua de riego aplicada en el predio, problema que generalmente no es considerado tanto para el diseño de nuevas obras de riego (aspersión, goteo y riego superficial) como en las ya existentes. Dicha ineficiencia en la aplicación del agua de riego finalmente conlleva a pérdidas de fertilizante nitrogenado y posterior contaminación de los acuíferos subterráneos por lixiviación de éste (Best y Duke, 2001). El conocimiento de áreas uniformes en propiedades físicas y el uso de modelos computacionales, permitirán un mejor manejo del recurso hídrico con un aumento de la eficiencia de uso, tanto del agua como de fertilizantes nitrogenados, protegiendo así las aguas subterráneas de contaminantes.

Sheets and Hendrickx (1995), midieron la conductividad eléctrica (CE) a lo largo de un trayecto de 1950 m en Nuevo México (EE.UU.), por un período de 16 meses, y encontraron una relación lineal entre CE y el contenido de humedad en el suelo. Sudduth et al. (1999) y Williams and Hoey (1987), determinaron que la CE de los suelos puede proveer información de la textura y serviría para estimar la humedad de éste, siendo de alta relevancia para la sectorización de monitoreo y posterior diseño de sistemas de riego y plantación (**Figura 6.4**).

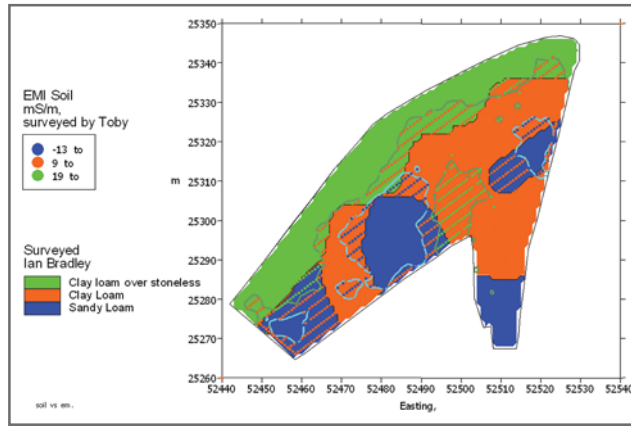


Figura 6.4: Comparación del plano CE y plano de texturas
* Fuente: Programa Agricultura de Precisión, Cranfield University, UK.

SISTEMA DE APLICACIÓN VARIABLE DE RIEGO PARA PIVOTES

Es sabido, que la introducción de los avances en riego tecnificado han sido un importante factor para el desarrollo de la agricultura, optimizando un recurso limitado y dando seguridad de riego para la producción de cultivos. Si bien los avances en esta área son importantes, aún es factible aplicar tecnología de avanzada que permita realizar mejoras al sistema. Es el caso de la aplicación variable de riego en pivotes, para lo cual se identifica la variabilidad espacial de los requerimientos hídricos bajo el área

cubierta por el pivote, ya sea por la existencia de diferentes cultivos o por diferentes condiciones de suelo, como se muestra en las **Figuras 6.5** y **6.6**.

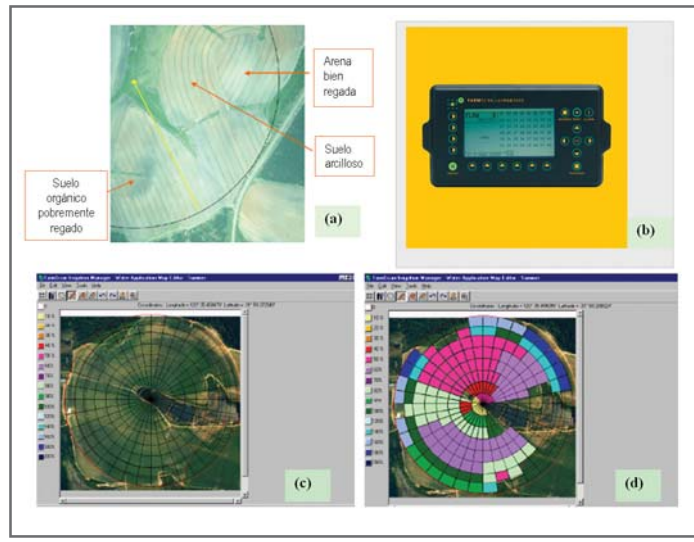


Figura 6.5: Sistema de riego diferencial en pivotes (a) desuniformidad de suelo, en un área regada por el mismo pivote, encontrándose al menos tres condiciones muy distintas de suelo; (b) panel de control sistema canlink3000 de la empresa FarmScan, en donde se puede programar los riegos diferenciales, controlando las tasas de riego en los emisores del pivote; (c) ejemplo de vista aérea y subdivisión de áreas de riego según el sistema instalado de aplicación diferencial; (d) mapa de aplicación de cargas de agua en función de los requerimientos del cultivo en las distintas zonas del área bajo riego.

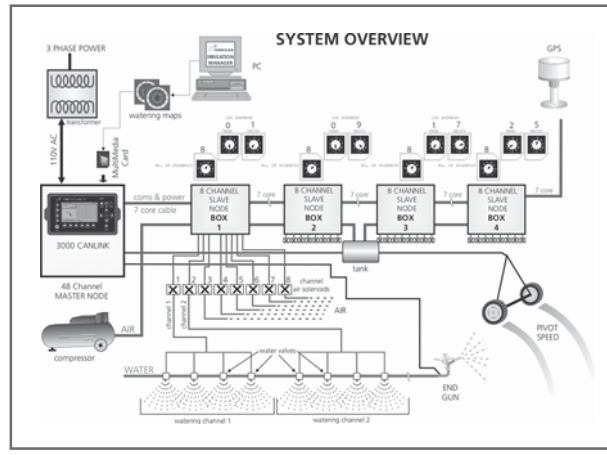


Figura 6.6: Diagrama de trabajo e instalación del sistema de riego diferencial en un pivote.

La aplicación de esta tecnología apunta a potenciar el objetivo del riego tecnificado en el sentido de la optimización del uso del recurso hídrico. Por otra parte, también existe la posibilidad de

optimizar la aplicación de fertilizante como lo demuestra el estudio realizado en la estación experimental Humán de INIA Chile, en el cual se redujo 100 unidades de nitratos en maíz sólo por el uso eficiente de los fertilizantes, ajustado a los requerimientos temporales del cultivo y la variabilidad espacial de suelo del área (**Figura 6.7**).

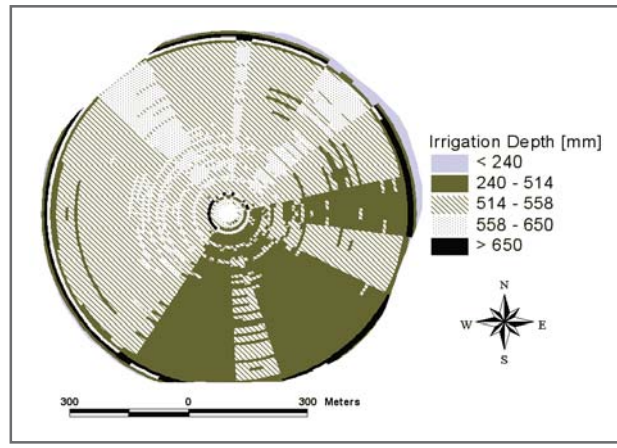


Figura 6.7: Distribución de riego estacional en área de estudio.

Sistema de aplicación variable de riego para frutales y viñas

Se ha encontrado que la variabilidad espacial de estatus hídrico (EH) en frutales y viñedos (Best et. al, 2005) está en concordancia con la gran variabilidad de la producción y calidad de la fruta (**Figura 6.8**). En este sentido, la evolución de las determinaciones del EH en estos cultivos ha pasado desde las determinaciones basadas en suelo y micrometeorológicas, hasta aquellas basadas en micrometeorología y plantas, como la determinación del potencial hídrico xilemático, dada su significancia fisiológica directa con el EH y su consistencia.

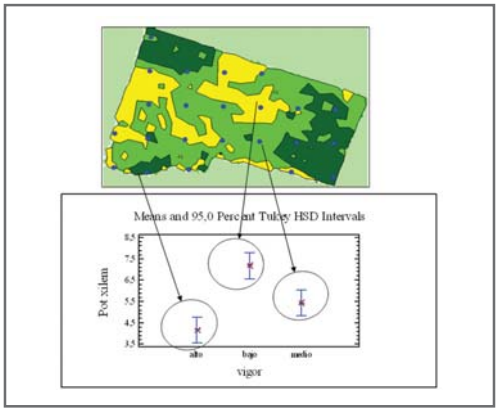


Figura 6.8: Evaluación de variabilidad de estrés hídrico de un viñedo (basado en la variabilidad del potencial hídrico xilemático), según zonas de vigor obtenidas de información de percepción remota (planos de NDVI).

Así, se debe considerar la variabilidad espacial de los suelos para el diseño de cualquier nueva plantación y en las ya plantadas, se debe considerar el rediseño siempre y cuando la rentabilidad de realizar esto sea positiva, es decir, en cuarteles de alta calidad. Por otra parte, para mejorar la eficiencia en los viñedos y frutales cuando son regados homogéneamente, es necesario utilizar un monitoreo dirigido, el cual debe focalizarse en el área más importante en superficie del cuartel, de tal forma que se potencie la mayor cantidad de plantas con un manejo adecuado del riego.

Sectorizaciones

El uso de información de percepción remota ha demostrado altas potencialidades sobre la base del uso de planos de vigor (NDVI), no solo para el tema de manejo, sino también, en decisiones de cosecha. En la **Figura 6.9** se muestra un criterio simple de sectorización, en base a la elección de lotes que presenten vigor medio – bajo y medio – alto según el índice de NDVI. Como se aprecia en esta Figura, el cuartel queda dividido en tres sub-áreas de manejo y cosecha diferenciada.

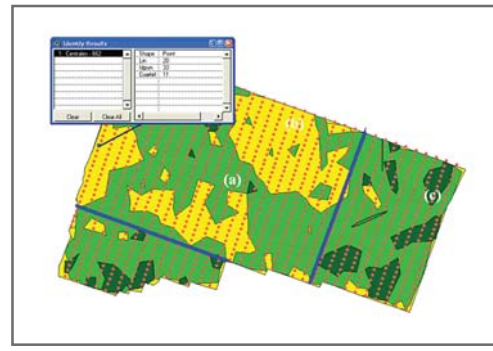


Figura 6.9: Sectorización potencial en base a criterio de producción en el cuartel, mostrando sectores (a) y (c) con vigor medio – alto y (b) con vigor medio-bajo.

Automatización de sistemas de riego

Actualmente, los sistemas de riego presurizados, han estado integrando sistemas de automatización de decisiones de riego sobre la base del monitoreo localizado de condiciones hídricas de suelo y sistemas de comunicación remota (**Figura 6.10**).

Figura 6.10: Esquema de sistema automatizado de monitoreo y aplicación de riego.
* Fuente: Universidad Florida, EEUU., 2005

REFERENCIAS

Best, S.C. y Duke, H.R. 2001. Spatial distribution of water and nitrogen application under center pivot sprinklers. Proceedings of Central Plains Irrigation course and exposition. Central Plane Irrigation Association. Kearney, Nebraska. pp. 58-65.

Best, S.; León, L. y Claret, M. 2005. Use of Precision Viticulture Tools to Optimize the Harvest of High Quality Grapes. Proceedings of Frutic05 Conference, 7th edition of Fruit, Nut and Vegetable Production Engineering Symposium. Montpellier, France. P. 75

Sheets, K.R. y Hendrickx, J.M. 1995. Noninvasive soil water content measurement using electromagnetic induction. Water Resources Res. 31(10): 2401-2409.

Sudduth, K.A.; Kitchen, N.R. y Drummond, S.T. 1999. Soil conductivity sensing on claypan soils: Comparation of electromagnetic induction and direct methods. p. 971-990. In. P.C. Roberts et al. (ed.) Proc. 4th International Conference on Precision Agriculture. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.

Williams, B.G. y Hoey, D. 1987. The use of electromagnetic induction to detect the spatial variability of the salt and clay contents of soil. J. Soil Sci. 25:21-27.

6.3. ENCALADO CON DOSIS VARIABLE

Sebastián Gambaudo (1) **y Rodolfo Bongiovanni** (2)
sgambaudo@rafaela.inta.gov.ar y rbongiovanni@correo.inta.gov.ar
(1) Proyecto Encalar, INTA Rafaela - (2) INTA Manfredi, Argentina

EL PROBLEMA DE LA ACIDIFICACIÓN DE LOS SUELOS Y SU CORRECCIÓN

La fertilidad de un suelo tiene tres componentes: uno físico, uno químico y uno biológico. De todos ellos, el más conocido por el productor es el químico, pues está acostumbrado a hablar de deficiencias de nitrógeno, fósforo y en algunos lugares de azufre, potasio. Pero hay otro aspecto dentro del componente químico que comienza a manifestarse como problema y es la acidez del suelo.

Origen del problema

En Argentina, el origen de la acidez en los suelos con aptitud agrícola, de acuerdo a estudios que vienen realizando diferentes Estaciones Experimentales del INTA y Facultades de Agronomía, se debería a la extracción de nutrientes diferencial de calcio y magnesio de la capa arable, por parte de los cultivos realizados.

Existen también otras causas que pueden determinar una acidez del suelo, pero no son de importancia para la región pampeana argentina. Estas serían el material de origen, la profundidad del suelo, las precipitaciones, la descomposición de la materia orgánica, la vegetación natural, la remoción de bases a través de la cosecha de cultivos, o por el residuo ácido que dejan en el suelo los fertilizantes nitrogenados (Potash & Phosphate Institute, 1997).

Ventajas de su corrección

La corrección de acidez en los suelos proporciona las siguientes ventajas:

- Aumento de la disponibilidad del fósforo, del calcio y del magnesio;
- Mejoramiento de la disponibilidad del nitrógeno, a través de la fijación biológica y de la acción de las bacterias nitrificadoras;
- Incremento en el número y eficiencia de los microorganismos responsables de la descomposición de la materia orgánica ó de las transformaciones del nitrógeno, fósforo y azufre;
- Reducción de la solubilidad de elementos que pueden alcanzar niveles de fitotoxicidad en suelos ácidos como el aluminio y el manganeso;
- Mejoramiento de la estructura del suelo al incrementar el contenido de calcio, elemento fundamental para la estabilidad del agregado, con la consiguiente ventaja en la aireación del suelo y en la infiltración del agua; y
- Aumento de rendimiento (granos y forrajes).

Cómo darse cuenta

Un diagnóstico de la acidez edáfica comprende varios aspectos que son los siguientes: el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el porcentaje de saturación de bases, la concentración de calcio y de magnesio y la relación entre ambos elementos.

El valor del pH del suelo (**Cuadro 6.2**) es indicador de su grado de acidez, neutralidad o alcalinidad, que se relaciona con numerosas propiedades del mismo, influyendo sobre la solubilidad de los nutrientes, el crecimiento y el rendimiento de las plantas. Además, se vincula con el material que dio origen a los suelos, es decir, con los minerales que lo integran (calcio y magnesio) y con la forma en que se fueron alterando.

Cuadro 6.2: Valor del pH del suelo como indicador de acidez, neutralidad o alcalinidad

Acidez				Neutralidad		Alcalinidad			
Muy fuerte	Fuerte	Media	Moderada	Ligera	Ligera	Moderada	Media	Fuerte	Muy fuerte
3,0 4,0	5,0	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,5	10,5

La adaptabilidad de las plantas es diversa y varía a lo largo de la escala de pH, determinándose que para valores entre 6,5 y 6,8 no habría restricciones de crecimiento para ninguno de ellas. Se considera que un suelo es ácido cuando se encuentra por debajo de pH 6 y es alcalino cuando el valor es superior a 7,5.

Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Es la suma total de los cationes (calcio, magnesio, potasio, sodio, etc.) que un suelo puede retener. Representa más bien la densidad de carga negativa de un suelo y su capacidad de retención de los nutrientes. Cuanto mayor es la CIC mayor será la cantidad de cationes que éste puede retener (**Cuadro 6.3**). Los componentes de la CIC son los coloides del suelo: materia orgánica y arcilla. Por esa razón, la textura tiene mucho que ver cuando consideramos esta propiedad del suelo, siempre encontraremos valores mayores de CIC a medida que el suelo tenga más arcilla.

Cuadro 6.3: Valor de CIC y su relación con el nivel de retención de cationes por el suelo.

Capacidad de Intercambio Catiónico (meq/100g)	Nivel
Menor de 6	Muy bajo
Entre 6 y 12	Bajo
Entre 13 y 20	Medio
Entre 21 y 30	Alto
Mayor de 30	Muy alto

Porcentaje de saturación de bases

Uno de los métodos más utilizados para calcular la cantidad de enmienda a agregar, se basa en el porcentaje de saturación de las bases presentes y el de cada una de ellas, considerando valores referencias como los siguientes (**Cuadro 6.4**):

Cuadro 6.4: Nivel de saturación de bases como indicador de la necesidad de enmienda.

Nivel	% Calcio (Ca)	% Magnesio (Mg)	% Potasio (K)
Bajo	Menor de 60	Menor de 5	Menor de 1,5
Moderado	Entre 60 y 70	Entre 5 y 6	Entre 1,5 y 3,0
Bueno	Mayor de 70	Mayor de 6	Mayor de 3

CÓMO CORREGIR LA ACIDEZ DEL SUELO

El agregado de enmiendas al suelo, comúnmente llamado encalado, es la operación por la cual se le aplica compuestos de calcio ó calcio y magnesio que son capaces de incrementar el pH.

¿Qué es una enmienda adecuada?

Una enmienda comprende dos aspectos: la concentración de calcio y/ o magnesio que puede aportar y la velocidad de reacción de la misma. Ambos aspectos, concentración y granulometría, determinan el Poder Relativo de Neutralización Total (PRNT) que está compuesto por el Poder Neutralizador del material (PN) y su velocidad de reacción, Eficiencia Relativa (ER).

En Argentina, esto lo verifica la norma IRAM 22451, que establece los requisitos, las condiciones de recepción y los métodos de ensayos de los materiales calcáreos. En otras palabras, es lo que asegura una enmienda adecuada.

De acuerdo al PRNT se utilizará más o menos producto por hectárea para corregir la acidez del suelo, pudiéndose establecer la siguiente clasificación (**Cuadro 6.5**):

Cuadro 6.5: Calidad de los materiales calcáreos y su Poder Relativo de Neutralización Total.

Calidad	PRNT (%)
Superior	Más del 90 %
Buena	75 a 90 %
Regular	60 a 74 %
Inferior	45 a 59 %

La decisión de realizar la práctica del encalado debe basarse en un análisis de suelo, el que debe ser interpretado por un profesional y será el que decide la dosis a utilizar. Desde el punto de vista agronómico, interesa conocer si al suelo es necesario reponerle el nivel de calcio y/o de magnesio. En ese caso vamos a estar frente a enmiendas diferentes:

1. Dolomítico: concentración de óxido de magnesio (OMg) superior al 12%;
2. Magnesiano: si la concentración de OMg está entre 5 y 12%; y
3. Calcítico: si contiene menos del 5%.

Por lo tanto, si es necesario modificar el contenido de los dos elementos conviene utilizar un material dolomítico, que presenta un poder neutralizador mayor. Si solamente se desea corregir el nivel de calcio se deberá optar por un material calcítico.

La velocidad de reacción en el suelo (solubilidad) dependerá del tamaño de las partículas, esto equivale a decir que el material más fino reacciona más rápidamente y tiene menor residualidad en el tiempo. A medida que aumenta su tamaño, disminuye la velocidad de reacción, por lo que su efecto será menos inmediato.

¿Qué tener en cuenta?

Si se decide realizar la corrección de la acidez edáfica, se deberían tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Realizar la incorporación con anterioridad a la siembra del cultivo o pastura: gramíneas 2-3 meses y leguminosas 3 meses, dependiendo de la granulometría de la enmienda;
- Dada la baja solubilidad del carbonato es preferible una aplicación dividida en la incorporación (mayor profundidad con la labranza principal, menor profundidad de incorporación con las labores secundarias);
- No elevar el pH en más de una unidad por vez, a los efectos de no modificar el contenido de materia orgánica consecuencia de una mayor actividad microbiana; y
- En sistemas de siembra directa, la aplicación en superficie sólo modificará la acidez en los primeros centímetros, donde se acumulan los restos vegetales. Si el problema es importante debe solucionarse antes de comenzar con este sistema o realizar una corrección parcial (en la línea de siembra) con productos granulados de mayor solubilidad y para cada uno de los cultivos a utilizar.

En la región pampeana de Argentina se encuentran lugares donde es necesario realizar la corrección de la acidez para obtener buenos rendimientos de los cultivos, encontrándose respuesta en alfalfa, soja, trigo, maíz y sorgo granífero.

ENCALADO CON DOSIS VARIABLE

La mayoría de los cultivos requieren encalado si el pH está por debajo de 5, y no lo necesitan si el pH es 7 o mayor. En el otro extremo, si el pH es mayor a 7,5 el suelo se torna muy básico, afectando la disponibilidad y absorción de nutrientes, como así también la actividad de los microorganismos. Además, el pH del suelo potencialmente influye sobre la selección, el daño y la efectividad de los herbicidas (Childs et al., 1997).

El encalado para corregir la acidez del suelo se viene practicando desde hace mucho tiempo, pero en los últimos años hay una tendencia decreciente en su uso, a la vez que aumentan los rendimientos y el uso de fertilizantes nitrogenados (Frank, 1994). Tanto productores como agrónomos reconocen desde hace mucho tiempo que existe variabilidad dentro de los lotes, y particularmente, se destaca que el pH es una de las características del suelo que presenta la mayor variación espacial (Cline, 1944).

El encalado para corregir el pH representa un costo importante para los productores. El costo unitario de esta enmienda es relativamente bajo con respecto a los fertilizantes, pero las dosis de aplicación son comparativamente altas. La aplicación de cal se hace por toneladas, en vez de los kg que se usan para nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). La dosis uniforme puede dejar áreas con aplicaciones de cal por debajo y/o por encima del óptimo, y el encalado en exceso puede producir un efecto negativo sobre el rendimiento del cultivo, en forma mucho más marcada que los fertilizantes.

Desde un punto de vista económico, la cal agrícola es un insumo que proporciona ciertos beneficios a un determinado costo. Si el encalado aumenta el rendimiento del cultivo (o disminuye la cantidad de otros insumos) y si la ganancia por aumento del rendimiento (o ahorro de otros insumos) excede el costo del encalado, entonces el encalado es rentable (Hall, 1983). Un productor que quiera maximizar la rentabilidad aplicará cal hasta el punto marginal en que los beneficios excedan el costo del encalado. ¿Cuál es la dosis óptima de encalado en cada sitio del lote? Responder esa pregunta implica saber cómo responde el cultivo al encalado.

Bongiovanni and Lowenberg-DeBoer (2000) publicaron un análisis económico del encalado con dosis variable (DV), cuyo principal objetivo fue determinar la rentabilidad de la DV de cal realizada por un contratista, usando datos reales de producción de veinte campos de Indiana, EE.UU., bajo una rotación maíz-soja de cuatro años. Es decir, que se consideró la sustentabilidad en el mediano plazo, y no solamente en un año.

Los autores estimaron la respuesta de rendimiento en maíz y soja al pH del suelo y a la saturación de bases, usando bases de datos de diferentes ubicaciones geográficas, obteniendo una respuesta cuadrática con un plateau y con una caída de rendimiento lineal a alto pH, debido al daño por herbicidas y a la deficiencia de micronutrientes (**Figura 6.11**).

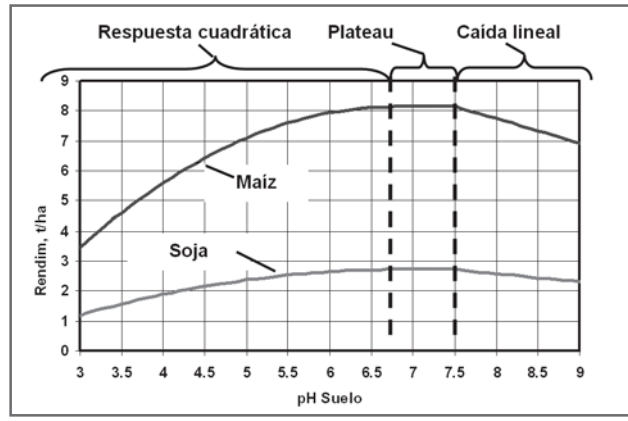


Figura 6.11: Respuesta de rendimiento al pH ilustrando tres estadios de producción (Bongiovanni and Lowenberg-DeBoer, 2000)

Para estimar la rentabilidad de la dosis variable en cuatro años tuvieron en cuenta tres estrategias de fertilización:

1) La DV basada en las recomendaciones agronómicas de extensión ("DV-agronómica"). Esta estrategia muestrea el suelo por cuadrículas y aplica la dosis de cal recomendada para cada cuadrícula en particular, usando las recomendaciones agronómicas, que buscan obtener el máximo rendimiento. Esta metodología es la que habitualmente se aplica en las regiones con problemas de acidez de suelo, se usa una tabla a la que se entra por el pH y la capacidad de intercambio catiónico (CIC), y se obtiene la recomendación de cantidad de cal a aplicar por ha. Un ejemplo de esto es la tabla que se usa para los estados de Indiana, Ohio y Michigan, en EE.UU. (Vitosh et al., 1995);

2) La DV basada en la optimización económica ("DV-económica"), que usa la regla de optimización, precio = valor marginal del producto, para determinar la dosis óptima de encalado para cada cuadrícula. Esta estrategia calcula una dosis de cal que maximiza el valor presente neto de la producción para un período de cuatro años y es la metodología más apropiada y sustentable desde el punto de vista económico, de la producción y del suelo.

3) Consideraron la "estrategia de información", que usa la información sitio-específica de las cuadrículas para determinar una dosis uniforme económicamente óptima para todo el lote. Este es un caso intermedio propuesto por Schnitkey et al. (1996) en Ohio, EE.UU., y se aplica al caso de productores que tienen análisis de suelos por cuadrículas y que no disponen de DV.

Las tres estrategias se compararon con la dosis uniforme (DU).

Los autores realizaron un modelo de simulación de la respuesta del cultivo al pH, usando funciones de producción estimadas con datos de ensayos de estaciones experimentales. El período considerado fue de cuatro años, porque coincide con el período en el que los productores realizan un análisis completo de suelos para mantener un pH adecuado. Por lo tanto, como se trata de buscar la dosis óptima para cuatro períodos de cultivo, se usó la metodología del Valor Actual Neto (VAN), ya que permite a los productores valorar los ingresos futuros de acuerdo al costo de oportunidad del capital. La función objetivo para maximizar la VAN, en una rotación de soja y maíz de cuatro años es:

$$V = \sum_{i=1}^{n} A_i \left[\frac{P_{maiz} Y_{i1maiz}}{(1+d)} - P_l(LR) - CostosVariables + \frac{P_{soja} Y_{i2soja}}{(1+d)^2} + \frac{P_{maiz} Y_{i3maiz}}{(1+d)^3} + \frac{P_{soja} Y_{i4soja}}{(1+d)^4} \right] \qquad (1)$$

donde:

V = VAN de los retornos netos por sobre los costos variables, para 4 años, en $/ha.

i = 1,…n: número de zonas de manejo.

A_i = Área en hectáreas por zona de manejo.

$P_{maíz}$ = Precio del maíz

P_{soja} = Precio de la soja

P_l = Costo de la cal agrícola

$Y_{t\ maíz}$ = Rendimiento del maíz en el año t, donde t= 1, 3. La función de producción del maíz es (3)

$Y_{t\ soja}$ = Rendimiento de soja en el año t, donde t= 2, 4. La función de producción de la soja es (4)

d = Tasa de descuento

LR = Requerimiento de encalado (t/ha) para dosis variable: $$LR = \frac{\left[\sqrt{\frac{pH_{it} - pH_{i0}}{Bs_i} + 1}\right] - 1}{0.446095}$$

pH_t = pH en el año t, donde t= 0, 1, 2, 3, 4. (La cal se aplica en el momento 0, pero el pH cambia cada año con cada ciclo de cultivo y aplicación de fertilizantes. Para calcular los rendimientos, la función de producción requiere un valor de pH para cada año).

Bs_i = Saturación de bases, definida por Black (1993): $$Bs_i = \left\{\frac{34.24}{\left[\frac{CEC_i + 0.957}{pH_{i0} - 2.043}\right] + 9.5}\right\} - 1.741$$

CIC = Capacidad de intercambio catiónico

La ecuación (1) muestra la VAN de los retornos netos por sobre los costos variables (ej.: trabajo, fertilizante, semillas, agroquímicos, reparación de maquinaria, combustible, costo de secado, intereses, almacenaje, seguros y otros). Debido a que estos retornos económicos son variables entre años, se pueden resumir mejor para el efecto de comunicación en USD/ha/año, usando la fórmula de anualización (2):

$$[V * d] / [1-(1+d)^{-4}] \qquad (2)$$

Rendimiento relativo del maíz = $$\begin{Bmatrix} -0.8287 + 0.5318 * pH - 0.0391 * pH^2, pH \le 6.8 \\ 0.98, pH > 6.8 \end{Bmatrix} \qquad (3)$$

Rendimiento relativo de la soja = $$\begin{Bmatrix} -0.7510 + 0.5003 * pH - 0.0367 * pH^2, pH \le 6.8 \\ 0.95, > 6.8 \end{Bmatrix} \qquad (4)$$

Los resultados indicaron un incremento del ingreso neto de la producción de maíz y soja, usando estrategias de manejo sitio-específico del pH. En promedio, el encalado con "DV-agronómica" proporcionó un aumento del ingreso neto anual de 7,24 USD/ha (+1,78%) por sobre la DU. El encalado con "DV-económica" brindó un aumento del ingreso neto anual de 19,55 USD/ha (+4,82%) por sobre la DU. La "estrategia de información", generó un aumento del ingreso neto anual de 14,38 USD/ha (+3,54%) por sobre la DU, lo que la ubica entre "DV-agronómica" y "DV-económica". Los ingresos fueron más altos en cuadrículas de 1 ha que en las de 0,4 ha, debido al costo extra del muestreo.

La "DV-económica" fue la estrategia que brindó los mayores ingresos en todos los campos evaluados. Los resultados de este estudio dependen en gran medida de las respuestas del cultivo al encalado utilizadas en este trabajo, las que son una simple aproximación de lo que ocurre en cada sitio del lote. Este modelo de simulación simplemente brinda una respuesta rápida a una pregunta urgente. Un modelo más completo debe incluir funciones de respuesta al encalado generadas *in-situ*, como así también las interacciones con otras prácticas de manejo. La metodología utilizada en este trabajo puede ser fácilmente adaptada a las condiciones de los países del Cono Sur de América.

EJEMPLO DE RENTABILIDAD DEL ENCALADO CON DOSIS VARIABLE

Para llevar a la práctica lo anteriormente expuesto, se puede tomar el ejemplo propuesto en la publicación editada por Lowenberg-DeBoer (2000), de un lote de 10 ha, dividido en tres zonas de manejo: Sudoeste (SO), Centro (C) y Noreste (NE). La zona del Centro tiene 4 ha, y el resto de las zonas 3 ha c/u, variando de un pH de 4,5 en el NE a un pH de 7 en el SO. El pH promedio de todo el lote es de 5,8 (**Figura 6.12**).

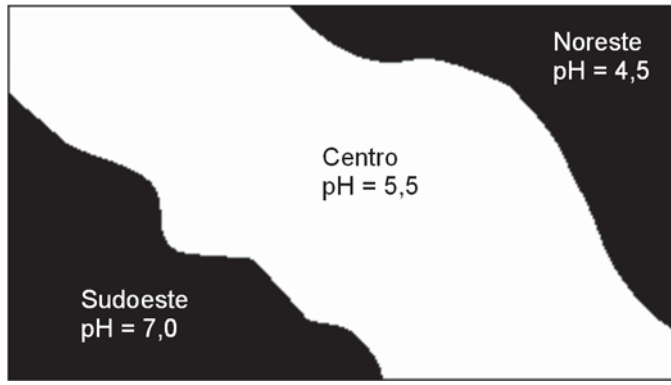


Figura 6.12: Ejemplo de un lote de 10 ha dividido en tres zonas de manejo (Adaptado de Brouder and Lowenberg-DeBoer, 2000)

En el NE, el rendimiento potencial de maíz es 8.779 kg/ha y el de soja 2.688 kg/ha, mientras que en el Centro y en el SO, el rendimiento potencial de maíz es 11.288 kg/ha y el de soja 4.031 kg/ha.

Una forma de decidir cuál es la dosis apropiada para cada zona es hacer un ensayo a campo, aunque requeriría estudiar los rendimientos a lo largo de los 4 años que dura el encalado, a la vez que también habría que tener en cuenta la interacción del pH con otros factores determinantes del rendimiento.

Una alternativa es usar las curvas de respuesta que se muestran en la **Figura 6.11** para calcular cuál sería el porcentaje del rendimiento máximo esperado a un pH determinado. Por ejemplo, para un pH de 5,5 la respuesta del maíz es del 91%, y para la soja es del 89% de su potencial de rendimiento máximo. Entonces, para un pH de 5,5, los rendimientos esperados serían de 10.272 kg/ha (11.288*0,91) para maíz y de 3.588 kg/ha (4.031*0,89) para soja.

Se considera que se requieren 6,73 t/ha de cal (ó 3 t/acre) para subir el pH en un punto (Black, 1993). Teniendo en cuenta el pH promedio de 5,8, la estrategia de dosis uniforme sería aplicar 4,48 t/ha a todo el lote. Analizando las curvas de respuesta, todavía se estaría dejando a la zona Noreste en un pH subóptimo (**Cuadro 6.6**), a la zona Centro cerca del óptimo y a la zona Sudoeste en el rango de caída de rendimientos por pH muy alto. En este ejemplo, la dosis uniforme permite aumentar los rendimientos en 4.929 kg de maíz y en 1.471 kg de soja, en la totalidad del lote.

Cuadro 6.6: Dosis de encalado y pH esperado por zona con dosis uniforme y con dosis variable

		Uniforme		Variable	
		Dosis	pH esperado	Dosis	pH esperado
Zona	pH inicial	t/ha			
Noreste	4,5	4,48	5,2	13,45	6,5
Centro	5,5	4,48	6,2	6,73	6,5
Sudoeste	7	4,48	7,7	0	7

Adaptado de Brouder and Lowenberg-DeBoer (2000)

Si en cambio, se utilizara la estrategia de **dosis variable**, se aplicarían 13,45 t/ha en la zona Noreste, 6,73 t/ha en la zona Centro y nada en la zona Sudoeste, lo que hace un total de 67,27 t de cal en todo el lote, un poco por encima de las 44,8 t necesarias para dosis uniforme. Como todas las zonas quedan con el pH cercano al óptimo, se obtiene un aumento de producción de 8.873 kg de maíz y de 2.694 kg de soja en todo el lote (**Cuadro 6.7**).

Cuadro 6.7: Rendimientos esperados por dosis uniforme y por dosis variable

Zona		Rendim. esperado al pH inicial	Rendim. esperado con dosis uniforme	Rendim. esperado con dosis variable
		Kg/ha		
Maíz	Noreste	6760	7726	8667
	Centro	10272	10949	11062
	Sudoeste	11062	10836	11062
	Media lote	9457	9946	10341
Soja	Noreste	2298	2600	2876
	Centro	3588	3790	3830
	Sudoeste	3830	3749	3830
	Media lote	3272	3420	3541

Costos

El costo del muestreo de suelos por zonas de manejo es de 13,45 USD/ha, igual al del encalado con dosis variable, mientras que el encalado con dosis uniforme cuesta la mitad (6,73 USD/ha). La cal agrícola cuesta 18 USD/t, y el análisis completo de suelo cuesta 7 USD.

Se asume que el precio neto (descontando los gastos de comercialización) que recibe el productor por cada tonelada de maíz es de 57,08 USD/t, y de 185,55 USD/t de soja.

En una rotación maíz/soja, el beneficio anual puede estimarse como el valor promedio del aumento de rendimiento de la soja y del maíz. Para el caso del maíz, el valor de la producción extra lograda por la dosis variable es de **506,53** USD (8.873 kg de maíz multiplicado por 57,08 USD/t).

El muestreo de suelos y el encalado se realizan una vez cada cuatro años, por lo que los costos deben anualizarse. En el **Cuadro 6.8** estos costos se consideran usando el método de depreciación lineal (un cuarto del costo por año), más un 10% de interés. Por lo tanto, el costo será de 0,35 (0,25+0,10), lo que se multiplica al costo total de cada categoría. La dosis uniforme tiene un costo de USD 308,25/año, o de unos 31 USD/ha, mientras que la dosis variable tiene un costo de USD 478,23/año, o de unos 48 USD/ha.

Cuadro 6.8: Rentabilidad anual esperada por dosis uniforme y por dosis variable en 10 ha.

Ítem	Uniforme	Variable	Diferencia
	USD		
Valor del aumento rendimiento			
Maíz	281,29	506,53	225,24
Soja	272,97	499,17	226,20
Promedio de rotación	277,12	502,85	225,73
Costos anuales			
Análisis de sueldos	2,45	7,35	4,90
Aplicación	23,56	47,08	23,52
Cal agrícola	282,24	423,80	141,56
Costo total	308,25	478,23	169,98
Retornos netos medios lote/año	-31,13	24,62	55,75
Retornos netos medios ha/año	-3,11	2,46	5,58

Adaptado de Brouder and Lowenberg-DeBoer (2000)

El **Cuadro 6.8** muestra la rentabilidad comparada de dosis uniforme versus dosis variable, donde se puede observar que en la dosis uniforme se pierde algo de dinero, debido a que deja la zona Noreste con un bajo pH y lleva la zona Sudoeste a un pH muy alto. En cambio, la dosis variable es modestamente rentable: 2,46 USD/ha. Este es un resultado típico del encalado con dosis variable, porque nadie se hace rico con esto, sino que es una práctica consistentemente rentable para los productores de maíz y soja en zonas de alta variabilidad de pH, lo que hace que su adopción sea potencialmente beneficiosa para los productores del Cono Sur de América.

AVANCES

Morgan y Adamchuk, del Departamento de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Purdue (EE.UU.) desarrollaron un sistema automático de muestreo de conductividad eléctrica del suelo, cuyos beneficios fueron evaluados empleando las curvas de respuesta de la **Figura 6.11** (Lowenberg-DeBoer, 2003; Adamchuk et al., 2001). El mapeo automático del pH de suelo, seguido por dosis variable de encalado resultó en un retorno neto de 6,13 USD/ha superior al muestreo manual por cuadrículas de 1 ha (**Figura 6.13**).

Este sistema de muestreo de pH y CIC desarrollado por la Universidad de Purdue se encuentra disponible comercialmente desde el 2003 como el "Veris Mobile Sensor Platform (MSP) with pH Manager" de la empresa Veris Technologies (**Figura 6.14**). Erikson (2004) brinda un completo informe sobre experiencias a campo realizadas con este equipo. En el Capítulo 4 de este libro, Roel y Terra también brindan detalles sobre el uso de estas técnicas avanzadas de muestreo de suelos. Por su parte, Best y León también hablan de este equipo en el Capítulo 8, Geoestadística (**Figura 8.3**).

Figura 6.13: Sistema automático de muestreo de conductividad eléctrica del suelo

Figura 6.14: Barra porta sensores móviles Veris con pH Manager

Por otra parte, en Junio 2005 se presentó el prototipo del "Sistema de Medición de pH Buffer y Determinación de Encalado (SpHLRMS)" en la Quinta Conferencia Europea de Agricultura de Precisión (5ECPA), en Uppsala, Suecia (Lowenberg-DeBoer, 2005). Este es un desarrollo conjunto del Centro Australiano de Agricultura de Precisión, del Instituto Sueco de Ingeniería Agrícola y Ambiental (JTI) y de la compañía australiana Computronics Holdings Limited. Este sensor toma una muestra de suelo, la mezcla con una solución buffer y la mide con transistor sensible a los iones (ISFET), lo que permite medir la acidez de reserva, además de la acidez activa. Debido a que los suelos difieren en su composición química, la cantidad de cal necesaria para cambiar el pH difiere ampliamente. El análisis de pH buffer considera las diferencias en el poder neutralizante, lo que permite crear recomendaciones de encalado en forma directa (**Figura 6.15**).

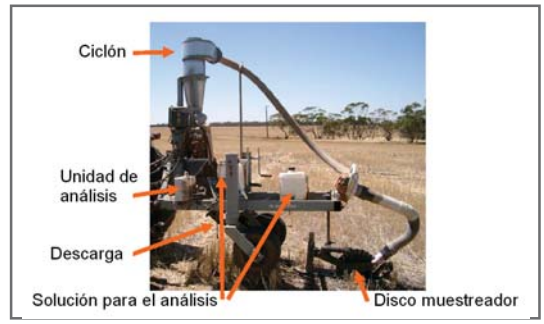


Figura 6.15: Sistema de Medición de pH Buffer y Determinación de Encalado (SpHLRMS)

REFERENCIAS

Adamchuk, V.I.; Morgan, M.T. y Lowenber DeBoer, J.M. 2001. Agroeconomic Evaluation of Intense Soil pH Mapping. . ASAE Meeting Paper No. 01-1019. St. Joseph, Mich.: ASAE.

Black, C.A. 1993. "Soil Testing and Lime Requirement", In: "Soil Fertility Evaluation and Control", Iowa State University, Ames, Iowa, USA. Lewis Publishers. Chapter 8, p. 693-694.

Bongiovanni, R. y Lowenberg-DeBoer, J.M. 2000. "Economics of Variable Rate Lime in Indiana" Journal of Precision Agriculture, 2, 55-70. Disponible en: http://www.agriculturadeprecision.org/articulos/analecon.htm

Brouder, S. y Lowenberg-DeBoer, J.M. 2000. Managing Long-Term Soil Fertility. Chapter 4, pp. 39-42 in: Lowenberg-DeBoer, J. (ed.). 2000. Precision Farming Profitability. Purdue University, West Lafayette, IN. 1st Edition. ISBN 0-931682-84-3. 132 p. www.purdue.edu/ssmc

Childs, D.; Jordan, T.; Bauman, T. y Ross, M. 1997. "1997 Weed Control Guidelines for Indiana." Purdue University, West Lafayette, IN. p. 31

Cline, M. 1944. "Principles of Soil Sampling." Soil Science 58:275-288.

Erikson, B. 2004. Field Experience Validates On-The-Go Soil pH Sensor. http://www.agriculture.purdue.edu/ssmc/Frames/SSMC%20_newsletter12_04.pdf

Frank, C. 1994. "Illinois Agronomy Handbook 1995-1996." Cooperative Extension Service, University of Illinois, Urbana-Champaign, Illinois. Circular 1333, pp. 74-78.

Hall, H. 1983. "Economic Evaluation of Crop Response to Lime." Paper No. 81-1-153, Kentucky Agricultural Experiment Station. American Agricultural Economics Association, November 1983., pp. 811-817

Lowenberg-DeBoer, J.M. 2005. New Grain and Soil Sensors at the 5th European Precision Agriculture Conference. SSMC Newsletter July 2005. www.purdue.edu/ssmc

Lowenberg-DeBoer, J.M. 2003. Soil pH sensor Commercialized. http://www.agriculture.purdue.edu/ssmc/Frames/Dec2003_Purdue_NL1.htm

Lowenberg-DeBoer, J. M. (ed.). 2000. Precision Farming Profitability. Purdue University, West Lafayette, IN. 1st Edition. ISBN 0-931682-84-3. 132 p. www.purdue.edu/ssmc

Potash & Phosphate Institute. 1997. "Manual internacional de fertilidad de suelos". PPI, 655 Engineering Drive, Suite 110, Norcross, GA 30092-2837, USA. Capítulo 2.

Schnitkey, G.; Hopkins, J. y Tweeten, L. 1996. "Information and application returns from precision fertilizer technologies: a case study of eighteen fields in northwest Ohio." Paper, The Ohio State University, Department of Agricultural Economics, 29 p.

Veris. 2005. http://www.veristech.com/pdf_files/MSP_PDF.pdf. (Consultada el 13/12/2005).

Vitosh, M.; Johnson, J. y Mengel, D. 1995. "Tri-State Fertilizer Recommendations for Maize, Sojabeans, Wheat and Alfalfa." Michigan State University, The Ohio State University, Purdue University. Extension Bulletin E-2567, July, p. 3.

6.5. CONTROL DE MALEZAS, PLAGAS Y ENFERMEDADES CON DOSIS VARIABLE

Rodolfo Bongiovanni
rbongiovanni@correo.inta.gov.ar
INTA Manfredi, Argentina

INTRODUCCIÓN

La idea del manejo sitio-específico es hacer lo correcto, en el lugar adecuado y en el momento oportuno. Esta idea es tan vieja como la agricultura, pero durante la mecanización de la agricultura en el siglo XX hubo una gran motivación económica para tratar grandes extensiones de tierra con prácticas agronómicas uniformes. La agricultura de precisión vino a proporcionar una forma de automatizar el manejo sitio-específico usando la informática y haciendo que pueda tener una aplicación práctica en la agricultura comercial. La agricultura de precisión incluye todas las prácticas de producción agrícola que usan la informática para ajustar el uso de insumos de modo tal que permita obtener el producto deseado, o para monitorear dicho resultado (por ejemplo, la aplicación con dosis variable).

Lowenberg-DeBoer y Swinton (1997) definen el manejo sitio-específico como el "control y monitoreo electrónico aplicado a la recolección de datos, procesamiento de la información y apoyo para la toma de decisiones, para la ubicación temporal y espacial de insumos en la producción de cultivos".

La agricultura de precisión tiene el potencial de proporcionar a los productores modernas herramientas para manejar esos insumos que tienen que ser importados al campo. En lugar de aplicar fertilizantes o pesticidas indiscriminadamente en dosis uniformes sobre grandes áreas, la agricultura de precisión permite a los productores afinar la puntería con las aplicaciones. En cierto sentido, la agricultura de precisión sustituye la información y el conocimiento por algunos insumos físicos externos, acercando potencialmente al campo al ideal del balance biológico. Por supuesto, la tecnología informática y el conocimiento que hacen que la agricultura de precisión funcione, también son insumos externos. La esperanza que se pone en la agricultura de precisión es que sea menos "desequilibradora" de los sistemas naturales de lo que lo han sido los insumos físicos aplicados indiscriminadamente.

Las pestes relacionadas con la producción agrícola incluyen las malezas, los insectos y las enfermedades, aunque la mayor proporción de pesticidas aplicados en agricultura es para el control de malezas. Los principales problemas ambientales que enfrenta la agricultura por el uso de herbicidas tienen que ver principalmente con la contaminación del agua superficial y sub-superficial.

Las malezas y los productores vienen compitiendo por el rendimiento de los cultivos desde que se practica la agricultura. La agricultura de precisión dispone de un conjunto de tecnologías para ayudar a reducir los potenciales problemas ambientales, tales como el mapeo espacial y temporal de la densidad poblacional de malezas, dosis variable para aplicar herbicidas solamente en ciertas áreas y mapas de rendimiento, como una herramienta de diagnóstico del efecto de las malezas sobre el rendimiento, entre otras tecnologías disponibles. Los ataques de insectos y las enfermedades se pueden tratar en forma similar usando los mismos principios. De todos modos, es importante aclarar que antes de que la agricultura de precisión sea una herramienta que forme parte de las estrategias de manejo integrado de pestes, los modelos de manejo de pestes tendrán que demostrar un equilibrio entre los beneficios privados que se obtienen por un menor costo

de uso de herbicidas y los beneficios sociales que se obtengan por la reducción en la cantidad de herbicida aplicada.

Mortensen (1999) indica que la población de malezas presenta variabilidad espacial a lo largo y a lo ancho de los lotes debido a la variabilidad en materia orgánica, textura del suelo, topografía y la interacción de todos estos factores con el manejo del cultivo, el tipo de cultivar sembrado y otras interacciones que existen dentro de un lote.

Bongiovanni and Lowenberg-DeBoer (2004) realizaron una extensa revisión bibliográfica de estudios del impacto del manejo sitio-específico de herbicidas, insecticidas y otros agroquímicos sobre el ambiente. La revisión bibliográfica deja en evidencia que el manejo espacial de insecticidas y herbicidas puede reducir la cantidad total de agroquímicos, aplicándolos solamente donde existen problemas. La agricultura de precisión tiene el potencial de ser un sistema que no sólo protege el ambiente, sino que también es económicamente viable. Si aceptamos que el campo necesita insumos externos, también tenemos que estar dispuestos a aceptar que un insumo importante es la información. La agricultura de precisión puede contribuir de muchas maneras a la agricultura sustentable en el largo plazo, confirmando la idea intuitiva de que reduce la carga de agroquímicos sobre el ambiente, aplicando fertilizantes y pesticidas solamente donde se los necesita, y cuando se los necesita. Desde este punto de vista, los beneficios provienen de un menor uso de insumos y consecuentemente, de una menor contaminación ambiental. Otros beneficios incluyen una reducción en la tasa de desarrollo de resistencia a los pesticidas.

DOSIS VARIABLE DE HERBICIDAS APLICADOS AL SUELO

Al leer las etiquetas de los herbicidas, y desde un punto de vista lógico, la aplicación sitio-específica es una necesidad obvia, ya que las dosis dependen de un conjunto de características del suelo que son variables, como ser la textura, materia orgánica, pH y capacidad de intercambio catiónico. Dado que cada familia de herbicidas tiene diferentes características químicas, el cambio en las características del suelo puede tener un efecto mínimo o pronunciado sobre el cambio en la dosis de herbicida.

Como se mencionó anteriormente, los beneficios de aplicar herbicidas al suelo con dosis variable pueden venir por: a) menor daño al cultivo por aplicación excesiva de herbicida en áreas que requieren dosis más bajas; b) por un mejor control de malezas donde se requieren dosis más altas; c) por menores dosis en zonas de manejo que pueden presentar una interacción negativa; y d) por una mejor relación beneficio/costo en el control de malezas.

DOSIS VARIABLE DE HERBICIDAS POST EMERGENTES

En general, el objetivo de la dosis variable de herbicidas aplicados al suelo es "reducir la dosis en algunas áreas y aumentar la dosis en otras, según sea necesario", aunque hay que tener en cuenta que todo el lote recibe una aplicación de herbicidas. Por el contrario, el objetivo de la dosis variable de herbicidas post emergentes es aplicar solamente en aquellas áreas donde están presentes las malezas. Con los herbicidas sistémicos que actúan por el follaje, cualquier aplicación que no de en el blanco y que termine en el suelo, queda adherido a la superficie del suelo y se degrada, perdiendo su eficacia en el control de la maleza.

El primer desafío de la aplicación de herbicidas post emergentes es localizar las malezas. Los mapas de malezas se pueden desarrollar a partir del conocimiento de infestaciones de años previos, los datos recogidos (marcados) con el monitor de rendimiento, los datos provenientes

del seguimiento del cultivo, o por análisis visual por parte del aplicador. Dado que las malezas tienden a diseminarse por semillas y/o vegetativamente, existe una alta probabilidad de que la infestación persista en el mismo lugar en años posteriores. Por lo tanto, la capacidad de dirigirse a un manchón de malezas identificado previamente, o la identificación de malezas sobre la marcha es un aspecto crítico para tener éxito en el manejo sitio-específico de las malezas.

Métodos de identificación georeferenciada de malezas

Así como para la dosis variable de fertilizantes es necesario realizar un mapa de disponibilidad de nutrientes del lote, para realizar dosis variable de herbicidas post emergentes también es fundamental realizar una identificación correcta de la infestación y de los manchones de malezas distribuidos en el lote. Para esta tarea se pueden recurrir a diferentes métodos.

El método más usado en cultivos tradicionales es, probablemente, el uso de un monitor de rendimiento con GPS, equipado con un "marcador", para mapear las áreas enmalezadas. Esta información se puede analizar posteriormente en un GIS y tomar decisiones sobre su manejo para el siguiente año. Por lo general, hay manchones de malezas que se ven desde la cabina de la cosechadora y que no se alcanzaban a distinguir durante el crecimiento del cultivo. Al marcar estos manchones con el monitor de rendimiento, se puede confeccionar un mapa de malezas invasoras para su futuro tratamiento, o determinar zonas de manejo dentro del lote que requieran alguna medida especial de control.

A pesar de que en la actualidad se usan muchos métodos diferentes de identificación georeferenciada, el objetivo de estos métodos es el mismo: censar la población de malezas en el lote lo más precisamente posible. Como actualmente es imposible detectar absolutamente cada maleza en cada lote, los métodos de identificación tendrán que lograr un equilibrio entre la precisión de la medición y el tiempo/costo dedicado a esta tarea.

Una forma de relevar la mayor cantidad posible de información con el menor costo sería a través del uso de imágenes aéreas, como lo viene haciendo con éxito Figueroa et al. en Tucumán, Argentina, para el control de "Tupulo" en caña de azúcar. El primer paso consiste en identificar los manchones de malezas en la fotografía aérea georeferenciada. Posteriormente, se corrobora que el manchón se corresponda con la maleza problema, a través de la "verdad de campo", es decir, la visita al sitio infectado. Por último, se elabora un mapa de aplicación binario, que consiste en zonas de aplicación y de no aplicación, para de esta forma ahorrar herbicida en aquellas zonas que no requieren tratamiento (**Figuras 6.16, 6.17 y 6.18**).

Figura 6.16: Identificación de manchones de tupulo en la fotografía aérea del cultivo de caña de azúcar (Figueroa et al., 2004)

Figura 6.17: Identificación de la maleza en el lote (Figueroa et al., 2004)

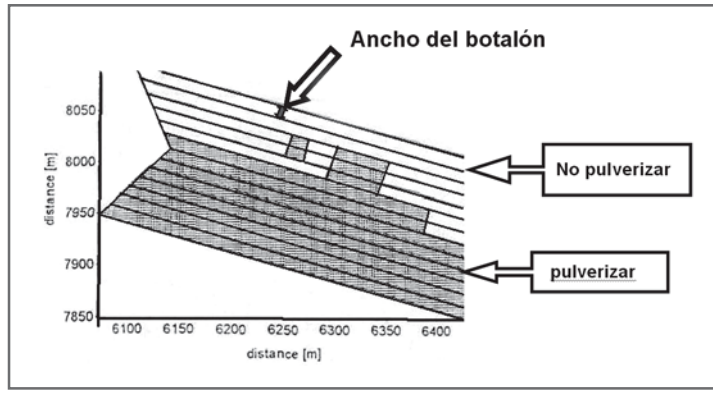


Figura 6.18: Mapa de aplicación de herbicida en forma sitio-específica (Figueroa et al., 2004)

CONCLUSIONES

Los beneficios potenciales de implementar un sistema de identificación georeferenciada de malezas son tres:

1. Se reduce el costo de aplicación de los herbicidas más caros;
2. Mejora el control de las malezas, a través del uso de herbicidas específicos que se dirigen a una población objetivo en forma sitio-específica; y
3. Menor competencia de malezas que se traduce en un aumento de rendimiento del cultivo.

EQUIPOS DISPONIBLES Y DESARROLLOS

En el mercado existen algunos equipos automáticos para realizar dosis variable de herbicidas post emergentes. Uno de los equipos disponibles es la pulverizadora autopropulsada PLA, de Argentina, que puede aplicar herbicida y fertilizante en forma simultánea. Posee dos tanques, dos botalones y dos computadoras. Posee un navegador, un controlador y un "actuador" que permiten variar la dosis en tiempo real (**Figura 6.19**).

Figura 6.19: Pulverizadora autopropulsada con dosis variable de herbicida y fertilizante.

La Universidad de Oklahoma (OSU) ha desarrollado un sistema de sensores que generan un índice verde sobre la marcha. El sistema puede diferenciar el índice verde del cultivo y de las malezas presentes, enviando una orden de pulverización en forma automática. Este equipo ya se encuentra disponible comercialmente, pero dado su precio de venta, es probable que su uso se limite en primera instancia a aquellos cultivos de alto valor económico (**Figura 6.20**).

Figura 6.20: Sistema automático de identificación y control de malezas WeedSeeker desarrollado por la Universidad Estatal de Oklahoma (OSU).

Por su parte, las Universidades de Illinois en Urbana-Champaign (EE.UU.) y de Lovaina (Bélgica), también han desarrollado prototipos pre-comerciales de sensores activos de malezas, vinculados a sistemas automáticos para el control de malezas (**Figuras 6.21 y 6.22**).

Figura 6.21: Pulverizadora autopropulsada "Smart sprayer" equipada para identificar y controlar malezas desarrollada por la Universidad de Illinois (UIUC, 2005).

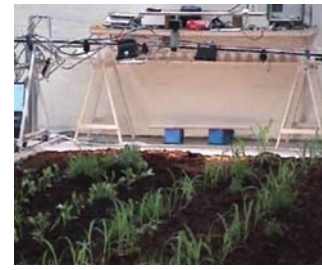


Figura 6.22: Sistema automático de identificación y control de malezas desarrollado por la Universidad Católica de Lovaina, Bélgica (De Baerdemaeker, 2004).

Estos son algunos de los desarrollos en los que se viene trabajando en todo el mundo, mencionados a título ilustrativo. Para mayor información sobre métodos de pulverización selectiva de herbicidas y su importancia económica, se puede consultar la completa revisión bibliográfica presentada recientemente por Moltoni y Moltoni (2005) en el Congreso Argentino de Ingeniería Rural (CADIR 2005).

REFERENCIAS

Bongiovanni, R.; y Lowenberg-DeBoer, J. 2004. "Precision Agriculture and Sustainability." Journal of Precision Agriculture. Precision Agriculture, 5, 359–387, 200

De Baerdemaeker, J. 2004. Measurements and data management for precision agriculture. Department Agro- Engineering and –Economics, K.U.Leuven, Kasteelpark Arenberg 30, B-3001 Leuven, Belgium, Email: Josse.debaerdemaeker@agr.kuleuven.ac.be, http://www.agr.kuleuven.ac.be/aee/amc/amc.htm

Figueroa et al.. 2004. Control de tupulo en caña de azúcar. Estación Experimental Obispo Colombres. Tucumán, Argentina. lrfigueroa@eeaoc.org.ar

Lowenberg-DeBoer J. y Swinton, S. 1997. Economics of Site-Specific Management in Agronomic Crops. In: The State of Site-Specific Management for Agriculture. F. Pierce and E. Sadler, ed. (ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin, 1997). Chapter 16, Pp. 369-396.

Moltoni A. y Moltoni, L. 2005. Pulverización selectiva de herbicidas: implicancias tecnológicas y económicas de su implementación en Argentina. Actas en CD del VIII Congreso Argentino de Ingeniería Rural. Villa de Merlo (San Luis) Argentina, 9 al 12 de Noviembre de 2005.

Mortensen, D.; Johnson, G.; Wyse, D. y Martin, A. 1994. Managing Spatially Variable Weed Population. In: Robert, P. et al (ed.), Site-Specific Management for Agricultural Systems. Proceedings of the 2nd International Conference on Precision Agriculture. March 27-30, 1994. Minneapolis, MN, USA. (ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin, 1995). Pp. 397-415.

University of Illinois at Urbana-Champaign (UIUC). 2005. Smart sprayer. http://age-web.age.uiuc.edu/remote-sensing/VariableRate.html

CAPÍTULO 7

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

José Orellana; Stanley Best y Marcelino Claret
jose@progapinia.cl; sbest@inia.cl; mclaret@inia.cl
Instituto de Investigaciones Agropecuaria (INIA), Chile

INTRODUCCIÓN

La agricultura mundial está cambiando. La consolidación predial (economías de escala), el incremento de la competitividad global, con la inestabilidad de los mercados que conlleva, y las mayores exigencias de calidad por parte de los consumidores, traducidas en regulaciones internacionales y cumplimiento de estándares de calidad, plantean nuevos desafíos a la productividad de la agricultura.

Administrar, regular, controlar y planificar las acciones que se desarrollan en un territorio determinado constituye una tarea muy compleja. En este sentido, identificar las variables que intervienen en el proceso de administración, permite conocer una parte del problema. Paralelamente, resulta imprescindible comprender y analizar las interrelaciones que existen entre esas variables. De este modo, es posible construir no sólo el escenario de comportamiento en un momento dado, sino simular comportamientos posibles, deseados o no, para conducir la gestión en el sentido deseado, o en el peor de los casos, poder reaccionar a tiempo ante situaciones imprevistas.

No es suficiente comprender el fenómeno sobre el que hay que accionar, es necesario haber acordado un marco conceptual y metodológico que evidencie la problemática y permita definir un rumbo, disponer de los datos necesarios para abordar el problema, sistematizar y procesar estos datos en información utilizable, y además, contar con las herramientas que permitan manejar y actualizar esta información en el tiempo y el espacio pertinente.

El campo de la planificación se define principalmente desde la acción que se anticipa a los fenómenos del entorno, por lo que la modelación se hace indispensable. Además, hoy es necesario predecir de modo continuo, y para ésto hay que contar con tecnología digital que colabore en la realización de modelos de situaciones para garantizar una adecuada toma de decisiones.

La tecnología de Sistemas de Información Geográfica (SIG), constituye en este sentido una de las herramientas adecuadas de manejo de información, ya que al usar el modelo de base de datos georrelacional se asocia un conjunto de información gráfica en forma de planos o mapas a bases de datos digitales.

Esto, sintéticamente quiere decir, que los SIG tienen como característica principal que el manejo de la información gráfica y alfanumérica se realiza de forma integrada, pudiendo abordar, de este modo, aspectos de alta complejidad relacional en el tema planteado.

Disponer de esa capacidad de comprensión y manejo de la complejidad, incluye el entendimiento de que también se ha modificado la dimensión del tiempo. La posibilidad de afrontar en forma dinámica y acelerada los fenómenos se presenta como otro de los importantes desafíos conceptuales y prácticos. En agricultura de precisión, la idea de contar con la información pertinente en el momento y lugar oportunos constituye otra fuerza vital a la hora de tomar decisiones de manejo predial, ya sea para reaccionar adecuadamente ante una situación emergente, como para generar un aumento en la productividad y el rendimiento del predio. Un SIG se transforma en una herramienta indispensable a la hora de administrar y hacer gestión, permitiendo monitorear diversas variables del entorno.

Más aún, no sólo es importante disponer de la estructura necesaria para la construcción, actualización y operación integral de bases de datos y viabilidad de la información -tendiendo a su manejo en tiempo real- sino que además, se requiere incorporar el concepto de información en proceso, haciendo referencia a la idea de información activa. Es decir, tender a la construcción automática y veloz de información para optimizar los modelos, haciéndolos también automáticos. Por estos motivos, relacionar los datos alfanuméricos con los gráficos es uno de los principales desafíos técnicos. Antes, se elaboraban modelos con programas informáticos simples que

permitían arribar a resultados importantes, pero que perdían su capacidad automática y relacional cuando había que modificar la mínima información de algún plano o mapa, precisamente por la ausencia de una base de datos que articulara los datos gráficos y alfanuméricos. Esto ha llevado, por ejemplo, al Programa de Agricultura de Precisión de INIA (Chile) a desarrollar herramientas que permiten la articulación de la información predial, administrativa y económica para generar elementos concretos que facilitan la labor administrativa y de gerencia. La construcción de modelos y programas informáticos con alta capacidad en el manejo de los datos pueden constituirse en vehículos de socialización, no sólo de la propia información generada, sino de las herramientas adecuadas que faciliten que la toma de decisiones se realice en el momento adecuado con los actores pertinentes.

Indudablemente la tecnología SIG permite solucionar amplias necesidades técnicas y al mismo tiempo, su uso ha impulsado a una modificación estructural del accionar teórico/práctico en el planeamiento de estas soluciones.

ANTECEDENTES DE LOS SIG

A finales de los años setenta, el uso de computadoras progresó rápidamente en el manejo de información cartográfica y facilitó que se afinaran muchos de los sistemas informáticos para distintas aplicaciones cartográficas. De la misma manera, se avanzó en una serie de sectores ligados, entre ellos la topografía, la fotogrametría y la percepción remota. En un principio, este rápido ritmo de desarrollo provocó una gran duplicación de esfuerzos en las distintas disciplinas relacionadas con la cartografía, pero a medida que aumentaron los sistemas y se adquirió experiencia, surgió la posibilidad de articular los distintos tipos de elaboración automatizada de información espacial, reuniéndolos en verdaderos sistemas de información geográfica para fines generales.

En los años ochenta, se vio la expansión del uso de los SIG, facilitado por la comercialización simultánea de un gran número de herramientas de dibujo y diseño asistido por ordenador (con siglas en inglés: CAD y CADD), así como la generalización del uso de microcomputadores y estaciones de trabajo en la industria, y la aparición y consolidación de las bases de datos relacionales, junto a las primeras modelizaciones de las relaciones espaciales o topología. En este sentido, la aparición de productos como ARC-INFO en el ámbito del SIG, ó IGDS en el ámbito del CAD, fue determinante para lanzar un nuevo mercado con una rapidísima expansión. La aparición de la Orientación a Objetos (OO) en los SIG (como el Tigris de Intergraph), inicialmente aplicado en el ámbito militar (Defense Map Agency - DMA) (OO), permite nuevas concepciones de los SIG, donde se integra todo lo referido a cada entidad (por ej., una parcela: simbología, geometría, topología, atribución). Pronto los SIG se comenzaron a utilizar en todas las disciplinas que necesitan la combinación de planos cartográficos y bases de datos como: ingeniería civil (diseño de carreteras, presas y embalses), agricultura (estudios medioambientales, estudios socioeconómicos y demográficos, planificación de líneas de comunicación, ordenación del territorio, estudios geológicos y geofísicos, prospección y explotación de minas, etc.).

En el caso particular de la agricultura, la utilización de los SIG parte por un proceso de aceptación de las tecnologías de información en las prácticas convencionales, causando un impacto en la forma de cultivar. Quizás el desarrollo más influyente para apresurar transferencia de tecnología a la agricultura ha sido el desarrollo del GPS. Incorporando el GPS en prácticas agrícolas estándares, los productores, los investigadores y los consultores han podido mejorar la precisión de las actividades de manejo agronómico existentes, poniéndolas en ejecución a escala. La agricultura de precisión y las tecnologías asociadas a la medición de la variabilidad han sido el resultado. Potencialmente, los factores determinantes del rendimiento se pueden identificar, mapear y utilizar, para proporcionar una solución.

Los años noventa, se caracterizan por la madurez en el uso de estas tecnologías en los ámbitos tradicionales mencionados y por su expansión a nuevos campos (SIG en los negocios), propiciada por la generalización en el uso de los computadores de gran potencia a precios muy accesibles, la enorme expansión de las comunicaciones y en especial de Internet, la aparición de los sistemas distribuidos (DCOM, CORBA) y la fuerte tendencia a la unificación de formatos de intercambio de datos geográficos. Todo ello favoreció la aparición de una oferta proveedora (Open GIS) que suministra datos a un enorme mercado de usuario final. El incremento de la popularidad de las tendencias de programación distribuida y la expansión y beneficios de la máquina virtual de Java, permiten la creación de nuevas formas de programación de sistemas distribuidos, de esta manera aparecen los agentes móviles que tratan de solucionar el tráfico excesivo que hoy en día se encuentra en Internet. Los agentes móviles utilizan la invocación de métodos remotos y la serialización de objetos de Java para lograr transportar la computación y los datos. Nace aquí un nuevo paradigma para el acceso a consultas y recopilación de datos en los sistemas de información geográfica, cuyos mayores beneficios se esperan obtener en los siguientes años. A la fecha, aprovechando estas tecnologías, se han desarrollado un sinnúmero de aplicaciones basadas en SIG que controlan maquinaria agrícola según agentes móviles.

En la actualidad, entre las herramientas de la agricultura de precisión se han incorporado otros equipamientos que se utilizan para control de las distintas actividades. Como lo son los monitores de siembra, que brindan información sobre la existencia de fallas de siembra por surco, o si un surco está sembrando a menor densidad de semillas que otro; monitores controladores de pulverización, que controlan el caudal de aplicación; monitores registradores de velocidad de cosecha, donde quedan grabados y geoposicionados los datos de velocidad de avance de la cosechadora, más el día y la hora en que se cosechó un lote; etc. Existe un gran avance en todo lo que respecta a sistemas de guía satelital, como lo son los banderilleros satelitales con señales correctoras por antenas Beacon y sistema E-dif. En el 2004 ingresaron a la Argentina los sistemas de guía automatizados de la empresa Trimble, como el Piloto Automático (AgGPS® Autopilot™ automated guidance system) y el Volante Automático (AgGPS EZ-Steer system Automated Steering for Agriculture Applications), donde el operario trabaja únicamente para girar la máquina en las cabeceras y después ésta se guía sola por medio del Piloto Automático o del Volante Automático. Ambos sistemas y el banderillero satelital trabajan partiendo de un punto de comienzo y uno de final del lote y respecto a ese trazo basa su sistema de guía (Bragachini et al, 2005).

El mapa del futuro es una imagen inteligente. A partir de 1998 se empezaron a colocar en distintas órbitas una serie de familias de satélites que traerían a los computadores personales, antes del año 2003, fotografías digitales de la superficie de la tierra con resoluciones que oscilarían entre 10 metros y 50 centímetros. Empresas como SPOT, OrbImage, EarthWatch, Space Imaging y SPIN-2 iniciaron la creación de uno de los mecanismos que será responsable de la habilitación espacial de la tecnología informática. Curiosamente, este "Boom" de los satélites de comunicaciones está empujando la capacidad de ancho de banda para enviar y recibir datos, hasta el punto de que –en este momento– la capacidad sólo concebida para fibra óptica de T1 y T3 se está alcanzando de manera inalámbrica. Por otro lado, la frecuencia de visita de estos satélites permite ver cualquier parte del mundo casi cada hora.

Hoy en día, contamos con herramientas como *Google Earth* que nos permiten acceder a imágenes satelitales de gran resolución, para conocer diversos lugares del globo. Todo esto gracias a la evolución de la tecnología satelital.

Las imágenes pancromáticas, multiespectrales, hiperespectrales, radar, infrarrojas, térmicas, crean un mundo virtual digital a nuestro alcance, el cual cambiará radicalmente la percepción que tenemos sobre nuestro planeta.

DEFINICIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Un SIG se define como un conjunto de métodos, herramientas y datos que están diseñados para actuar coordinada y lógicamente en capturar, almacenar, analizar, transformar y presentar toda la información geográfica y de sus atributos, con el fin de satisfacer múltiples propósitos. El SIG es una tecnología que permite gestionar y analizar la información espacial y que surgió como resultado de la necesidad de disponer rápidamente de información para resolver problemas y contestar a preguntas de modo inmediato. Existen otras muchas definiciones de SIG, algunas de ellas acentúan su componente de base de datos, otras sus funcionalidades y otras enfatizan el hecho de ser una herramienta de apoyo en la toma de decisiones, pero todas coinciden en referirse a un SIG como un sistema integrado para trabajar con información espacial, herramienta esencial para el análisis y toma de decisiones en muchas áreas vitales para el desarrollo nacional, incluyendo la relacionada con la infraestructura de un municipio, estado o incluso a nivel nacional.

Aunque al leer algunas definiciones de los SIG se puede pensar que es algo muy complejo, en realidad resulta sencillo de comprender si se percibe a un SIG como un programa de cómputo, un software con funciones específicas. En este sentido, un SIG es igual que una hoja de cálculo o un procesador de textos, sólo que para el caso de los SIG se tienen programas como *ArcView*, *MapInfo* o *Grass*, por citar a algunos.

En términos prácticos, la función principal de este software es contar con cartografía que contenga bases de datos asociadas, con la misión principal de resolver problemas espaciales o territoriales. Es decir, un programa que permita manejar conjuntamente la cartografía y las bases de datos alfanuméricas asociadas. Dicho de esta manera, se podría pensar en un CAD como *Autocad*, *Microstation* u otros que permiten asociar bases de datos a los elementos del dibujo. Pero la diferencia fundamental radica en que con un SIG es posible realizar análisis de la cartografía para generar nueva cartografía en función de los resultados obtenidos, además de hacer consultas más completas al poder combinar criterios alfanuméricos y espaciales.

Otras definiciones más académicas hacen hincapié en el SIG como disciplina o ciencia aplicada, incluyendo en su formulación no sólo al software sino también el hardware, equipo técnico y filosofía de trabajo, integrándolo todo de una forma global. Una de las más citadas es la del *National Center for Geographic Information and Analysis, N.C.G.I.A.:* "un sistema de hardware, software y procedimientos diseñados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión".

La definición del diccionario de la *Association for Geographic Information (AGI)* y el Departamento de Geografía de la Universidad de Edimburgo lo explica como: "un sistema de cómputo para obtener, almacenar, integrar, manipular, analizar y representar datos relativos a la superficie terrestre".

De estas definiciones se puede extraer que la importancia de los SIG radica en que las soluciones para muchos problemas, frecuentemente requieren acceso a varios tipos de información que sólo pueden ser relacionadas por geografía o por distribución espacial. Sólo la tecnología SIG permite almacenar y manipular información usando geografía para analizar patrones, relaciones y tendencias en la información, todo tendiente a contribuir a tomar mejores decisiones.

COMPONENTES DE UN SIG

- Hardware
- Software
- Información
- Personal
- Métodos

Hardware

Los SIG corren en un amplio rango de tipos de computadoras, desde equipos centralizados hasta configuraciones individuales o de red. Una organización requiere de hardware suficientemente específico para cumplir con las necesidades de aplicación.

Software

Los programas SIG proveen las herramientas y funcionalidades necesarias para almacenar, analizar y mostrar información geográfica. Los componentes principales del software SIG son:

- Sistema de manejo de base de datos;
- Una interfase gráfica de usuarios (IGU) para el fácil acceso a las herramientas;
- Herramientas para captura y manejo de información geográfica; y
- Herramientas para soporte de consultas, análisis y visualización de datos geográficos.

Actualmente, la mayoría de los proveedores de software SIG distribuyen productos "relativamente" fáciles de usar y pueden reconocer información geográfica estructurada en muchos formatos distintos. Sin embargo, en nuestra experiencia ha sido comprobado que por diversos factores, como el desempeño de funciones diversas por parte de los usuarios, quienes por lo general están más ocupados en sus labores –ya sea administrativa o de terreno–, no tienen la disposición o el tiempo para aprender nuevas herramientas. Las curvas de aprendizaje de la mayoría de los SIG disponibles en el mercado son relativamente altas, debido a que sus funcionalidades son genéricas y adaptadas a servir a múltiples propósitos. Debido a lo mismo, se puede concluir que, dependiendo las funcionalidades requeridas, es mejor contar con una herramienta desarrollada a medida, que realice lo necesario para el usuario y en lo posible que sus procesos sean lo más amigables en interfaz de usuario, y acorde a la cultura organizacional de la empresa, país o región donde se utiliza (**Figura 7.1**).

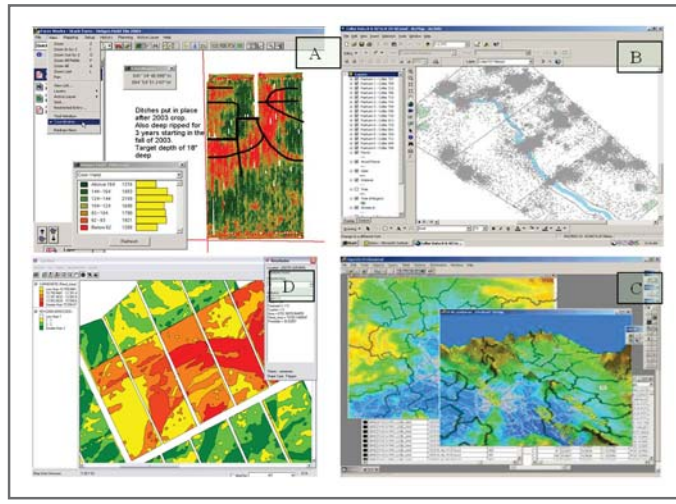


Figura 7.1: Pantallas de diferentes SIG existentes en el mercado A. Farm Works; B. ESRI ArcView; C. MapInfo; D. CorView (desarrollado por PROGAP-INIA Chile).

Información

El componente más importante para un SIG es la información. Se requiere de adecuados datos de soporte para que el SIG pueda resolver los problemas y contestar a preguntas de la forma más acertada posible. La consecución de datos correctos generalmente absorbe entre un 60 y 80% del presupuesto de implementación del SIG y la recolección de los mismos es un proceso largo, que frecuentemente demora el desarrollo de productos que son de utilidad. Los datos geográficos y alfanuméricos pueden obtenerse por recursos propios o a través de proveedores de datos. Mantenerlos, organizarlos y manejarlos debe ser política de la organización.

Personal

Las tecnologías SIG son de valor limitado si no se cuenta con los especialistas en manejar el sistema y desarrollar planes de implementación del mismo. Sin el personal experto en su desarrollo, la información se desactualiza y se maneja erróneamente, el hardware y el software no se manipula en todo su potencial.

Métodos

Para que un SIG tenga una implementación exitosa debe basarse en un buen diseño y reglas de actividad definidas, que son los modelos y prácticas operativas exclusivas en cada organización.

FUNCIONES DE LOS SIG

Los programas SIG tienen una serie de funciones diseñadas para la gestión de información geográfica:

- Captura, registro y almacenamiento de datos: el paso de información analógica, en papel, a formato digital de una computadora se puede realizar de varias maneras como digitalización, vectorización, importación y otras;
- Estructuración de datos y manipulación: creación de bases de datos, de nueva cartografía;
- Proceso, análisis y gestión de datos: topología, consultas gráficas, alfanuméricas, combinadas, superposición de planos e información;
- Creación de salidas: impresión de informes, graficación de planos y publicación en diversos formatos electrónicos.

¿Qué tipo de preguntas responde un SIG?

- Localización *¿Qué hay en...?*
- Condición *¿Dónde sucede que...?*
- Tendencias *¿Qué ha cambiado...?*
- Rutas *¿Cuál es el camino óptimo…?*
- Pautas *¿Qué pautas existen...?*
- Modelos *¿Qué ocurriría si...?*

Estas cuestiones son de interés primordial en actividades relacionadas con la planificación. Para instituciones de investigación, los SIG contribuyen en el estudio de la distribución y monitoreo de recursos, tanto naturales, como humanos, tecnológicos, de infraestructura y sociales, así como en la evaluación del impacto de las actividades humanas sobre el medio ambiente. De esta forma se contribuye, por ejemplo, en la planeación de actividades destinadas a la preservación de los recursos naturales.

Toda la generación de nueva información que puede proveer un SIG depende significativamente de la información que posee la base de datos disponible. La calidad de esta base de datos y sus contenidos determinan la cantidad y calidad de los resultados obtenidos del SIG.

FUNCIONAMIENTO DE LOS SIG

La construcción e implementación de un SIG en cualquier organización es una tarea siempre progresiva, compleja, laboriosa y continua. Los análisis y estudios anteriores a la implantación de un SIG son similares a los que se deben realizar para establecer cualquier otro sistema de información, sin embargo, en los SIG hay que considerar las características especiales de los datos utilizados y sus correspondientes procesos de actualización.

Es indiscutible que los datos son el principal activo de cualquier sistema de información. Por ello, el éxito y la eficacia de un SIG se miden por el tipo, la calidad y vigencia de los datos con los que opera.

Los esfuerzos y la inversión necesaria para crear las bases de datos y tener un SIG eficiente y funcional no son pequeños, aunque tampoco significa una gran inversión. Es un esfuerzo permanente por ampliar y mejorar los datos almacenados, utilizando las herramientas más eficientes para tal propósito.

El desarrollo paralelo de las disciplinas que incluyen la captura, el análisis y la presentación de datos en un contexto de áreas afines como catastro, cartografía, topografía, ingeniería civil, geografía, planeación urbana y rural, servicios públicos, entre otros, ha implicado duplicación de esfuerzos. Hoy en día, se ha logrado reunir el trabajo en el área de sistemas de información geográfica multipropósito, en la medida en que se superan los problemas técnicos y conceptuales inherentes al proceso.

Actualmente, la condicionante principal a la hora de afrontar cualquier proyecto basado en SIG lo constituye la disponibilidad de datos geográficos del territorio a estudiar, mientras que hace diez años, lo era la disponibilidad de computadoras potentes que permitieran realizar los procesos de cálculo involucrados en el análisis de datos territoriales. Pero además de ser un factor limitante, la información geográfica es, a su vez, el elemento diferenciador de un Sistema de Información Geográfica frente a otro tipo de Sistemas de Información. Así, la particular naturaleza de este tipo de información contiene dos vertientes diferentes: por un lado está la vertiente espacial y por otro la vertiente temática de los datos. Mientras otros Sistemas de Información, contienen sólo datos alfanuméricos (nombres, direcciones, números de cuenta, etc.), las bases de datos de un SIG integran además la delimitación espacial de cada uno de los objetos geográficos. Un SIG tiene que trabajar a la vez con ambas partes de información: su topografía, perfectamente definida en plano y sus atributos temáticos asociados. Es decir, tiene que trabajar con cartografía y con bases de datos a la vez, uniendo ambas partes y constituyendo con todo ello una sola base de datos geográfica.

De esta manera, se define a la topología como esta capacidad de asociación de bases de datos temáticas junto con la descripción espacial precisa de objetos geográficos y las relaciones entre ellos y es precisamente la topología lo que diferencia a un SIG de otros sistemas informáticos de gestión de información.

CONSTRUCCIÓN DE BASES DE DATOS GEOGRÁFICAS

La construcción de una base de datos geográfica implica un proceso de abstracción para pasar de la complejidad del mundo real a una representación simplificada, que pueda ser procesada por el lenguaje de las computadoras actuales. Este proceso de abstracción tiene diversos niveles y normalmente comienza con la concepción de la estructura de la base de datos, generalmente en capas. En esta fase, y dependiendo de la utilidad que se vaya a dar a la información a compilar, se seleccionan las capas temáticas a incluir.

Pero la estructuración de la información espacial procedente del mundo real en capas conlleva cierto nivel de dificultad. En primer lugar, la necesidad de abstracción que requieren las máquinas implica trabajar con primitivas básicas de dibujo, de tal forma que, toda la complejidad de la realidad ha de ser reducida a puntos, líneas o polígonos.

En segundo lugar, existen relaciones espaciales entre los objetos geográficos que el sistema no puede obviar. La topología, que en realidad es el método matemático-lógico usado para definir las relaciones espaciales entre los objetos geográficos, puede llegar a ser muy compleja, ya que son muchos los elementos que interactúan sobre cada aspecto de la realidad.

La topología de un SIG reduce sus funciones a cuestiones mucho más sencillas, como por ejemplo conocer el polígono (o polígonos) a que pertenece una determinada línea, o bien saber qué agrupación de líneas forman una determinada carretera.

En el caso de la agricultura de precisión, las bases de datos se construyen en base a un constante monitoreo del predio, análisis de fotografías multiespectrales e interpretación de los resultados obtenidos, formando un ciclo que permite elaborar un plan de manejo del predio. Esto, combinado con información económica y administrativa se transforma en una poderosa herramienta de toma de decisiones (**Figura 7.2**).

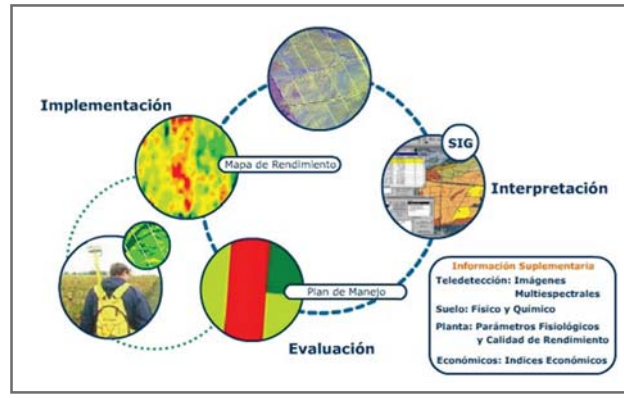


Figura 7.2: Ciclo de información asociada al uso y evaluación del SIG.

Para la construcción de bases de datos geográficas el programa de agricultura de precisión (PROGAP) de INIA Chile ha desarrollado herramientas que facilitan las labores de monitoreo y captura de información, además de mantener la información ordenada y almacenarla espacio-temporalmente para su posterior análisis. En el caso específico de las viñas se han desarrollado herramientas que permiten hacer estimaciones de rendimiento las cuales han tenido excelentes resultados (**Figura 7.3**).

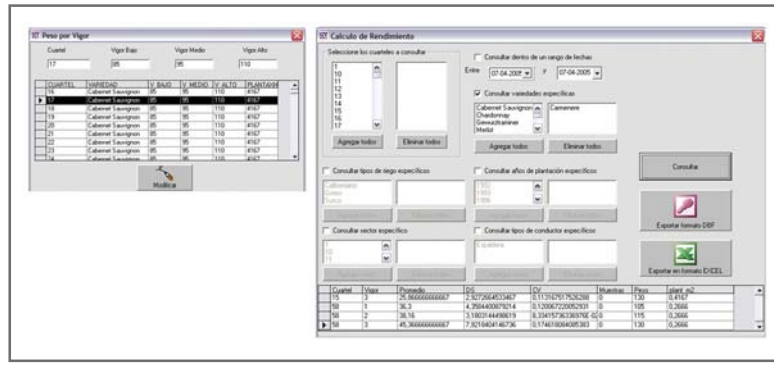


Figura 7.3: Sistema de manejo de base de datos del CorView, desarrollado por PROGAP-INIA Chile.

DESARROLLO FUTURO

El poder del conocimiento, preconizado por Peter Drucker desde mediados del siglo XX (Nascimento, 2002), nos obliga a desarrollar sistemas eficientes y eficaces de gestión de la información como un pilar fundamental para lograr una buena gestión del conocimiento en nuestras organizaciones.

Los Sistemas de Información tienen una enorme importancia en el incremento de la capacidad organizacional frente al cambio del entorno. La voluntad de lograr un sistema de información útil, que permita obtener una ventaja competitiva, implica la posibilidad de ofrecer múltiples, frecuentes, oportunas y relevantes informaciones.

Cualquier institución científica que abogue por alcanzar niveles elevados de eficiencia y eficacia en la gestión de sus funciones sustantivas debe considerar el desarrollo de iniciativas dirigidas en este sentido.

Para atender las necesidades cambiantes y emergentes del mercado, en nuestro continuo proceso de innovación tecnológica, hemos visto que se hace muy necesario manejar la información, de tal manera, que permita hacer una buena gestión. En el 2001 nace el concepto de Sistemas de Gestión Geográficos (Geographic Management Systems) como una mezcla entre los Sistemas de Información Gerencial (también conocidos como SIG en español, MIS, Management Information Systems, en inglés), los Sistemas de Información Geográfica y la Internet. El análisis de las necesidades y fuentes de información resultan importantes para cualquier sistema de información, pero son particularmente fundamentales para los sistemas de información gerencial (SIG). Desde el surgimiento de dicho término han existido un gran número de definiciones que acentúan alguno que otro aspecto (Nestel, 1991; Gijsbers, 1991; Laudon y Laudon, 1996). Una definición aplicable a nuestro sector sería "Un SIG es una base de datos actualizada y un sistema de análisis y evaluación para proporcionar a los actores del proceso de investigación (investigadores y gerentes) y sus clientes, información oportuna sobre insumos, actividades y resultados de la investigación para apoyar la toma de decisiones apropiadas". Un sistema de información gerencial puede estructurarse según las funciones organizacionales que apoya y que varían de acuerdo con la misión y el formato de las instituciones, no existiendo, por lo tanto, un patrón único para todas ellas. Para una organización de investigación agropecuaria las funciones pueden ser descritas a través del modelo de análisis de contexto, insumos, procesos y productos, modelo que podría ser adaptado para cualquier tipo de organización de investigación.

En resumen, los Sistemas de Gestión Geográficos (SGG) ayudan a los directivos y empleados con problemas estructurados, que ocurren generalmente a nivel táctico, y le proporcionan datos de fuentes internas y externas, así como un entorno generalizado de computación y de comunicaciones que puede ser aplicado a un conjunto diverso de problemas. Ayudan a hacer pronósticos de tendencias e identifican oportunidades, al mismo tiempo que ayudan a detectar problemas en la ejecución de los procesos establecidos. Facilitan el seguimiento del desempeño organizacional e incrementan el control de los diferentes niveles de dirección para apoyar que la toma de decisiones sea coordinada, pero descentralizada y que ocurra en los niveles operativos más bajos de la institución.

La idea de desarrollar un Sistema de Gestión Geográfico se hace atractiva desde el punto de vista que muchas empresas tienen predios en diferentes ubicaciones, para lo cual utilizar Internet como medio de comunicación y transmisión de datos permite tener una visión global de lo que

sucede en varios predios, facilitando la labor de gerencia a la hora de la toma de decisiones en empresas grandes. En el caso de estas empresas, generalmente utilizan algún tipo de ERP o manejan su información administrativa o económica en algún motor de bases de datos grande (Oracle, por ejemplo), en los cuales almacenan información que –combinada con la capturada y analizada en sistemas de información geográficos tradicionales– genera otra dimensión y calidad de información para ser analizada y utilizada en las decisiones de manejo. Pero la información *per se* es inútil si no es bien utilizada. La idea es crear "conocimiento", y la incorporación de la Gestión del Conocimiento en el desarrollo de estas herramientas es un desafío que, sin duda, generará aplicaciones poderosas, capaces de facilitar y mejorar la gestión de las empresas agrícolas (Bouthillier and Shearer, 2002).

REFERENCIAS

Bouthillier F. y Shearer K. 2002. Understanding knowledge management and information management: the need for an empirical perspective. Information Research, 8, 1.

Bragachini M.; Méndez A. y Scaramuzza, F. 2005. Innovación y Tendencias en Agricultura de Precisión. Proyecto Agricultura de Precisión. INTA Manfredi. http://www.agriculturadeprecision.org/presfut/InnovacionTendenciasAgPrec2005.htm

Gijsbers, G. 1991. Methods and procedures for the development of INFORM. ISNAR. The Hague, The Netherlands.

Laudon K. y Laudon J.P. 1996. Administración de los sistemas de información. 3ra Edición. Prentice Hall HispanoAmericana, México

Nascimento, J. 2002. La película del management en los 92 años de Drucker.

Nestel, B. 1991. An overview of INFORM, an information management system. ISNAR. The Hague, The Netherlands.

Trimble. 2005. Trimble Precision Ag Product Brochure. http://www.trimble.com/agriculture.shtml

CAPÍTULO 8

ANÁLISIS DE DATOS

8.1. GEOESTADÍSTICA

Stanley Best y Lorenzo León
sbest@inia.cl y lleon@inia.cl
Instituto de Investigaciones Agropecuarias
CRI INIA Quilamapu; Chillán, Chile

INTRODUCCIÓN

Dada su alta competitividad, los mercados agrícolas internacionales poseen estándares de calidad cada vez mayores, por lo que los países exportadores deben plantearse con urgencia la necesidad de hacer frente al cumplimiento de dichas exigencias, adelantándose a los hechos y respondiendo con mayor eficiencia a dichos requerimientos. En la mayoría de los casos no se cuenta con las herramientas necesarias para enfrentar este problema o aún peor, no se ha tomado conciencia de ellas y sus implicancias a mediano plazo. Una de las soluciones más consistentes a la problemática planteada, corresponde a la utilización de modernas tecnologías que nos permitan capturar, manejar y analizar información de calidad para tener una gestión técnica y económica más eficiente de los predios, tendencia que ha sido impulsada por la agricultura de precisión (AP).

La AP involucra la evaluación y manejo de la variabilidad en el campo, de tal manera que se produzcan cambios en las condiciones iniciales para optimizar la calidad y rendimiento de los productos. Lo anterior también implica, que el manejo de la variabilidad puede conducir a una reducción en los costos de producción y que dichas acciones de manejo, tales como la aplicación de niveles diferenciales de fertilización o distintas densidades de siembra, puedan ser controladas con mayor precisión.

Bajo este punto de vista, el mapeo de los datos es fundamental dentro de los procedimientos que encierra la AP. Sin embargo, debemos considerar que los mapas son abstracciones de la realidad, en donde los distintos elementos son representados por medio de líneas y polígonos. La utilización de los mapas ha sido tradicionalmente asociada a la ubicación de elementos en los mismos, sin embargo, actualmente, mediante los llamados Sistemas de Información Geográfica (SIG), el punto de vista ha variado hacia el resolver problemáticas que surgen al intentar realizar asociaciones de tipo espacial.

De esta manera, han surgido distintas herramientas para evaluar dichas asociaciones espaciales, las cuales se caracterizan, principalmente, por poseer un enfoque cuantitativo. Es decir, contestar en términos numéricos si una variable posee alguna especie de patrón espacial, de tal manera que pueda ser representada o, si esta misma variable, puede ser asociada a otra(s) y así explicar el comportamiento productivo y de calidad de un cultivo en términos espaciales y temporales. Estas evaluaciones son la principal temática del área denominada "geoestadística".

El objetivo del presente capítulo es dar a conocer las características fundamentales de distintos elementos de análisis de datos empleados en el área de la geoestadística, ejemplificando dichos conceptos en el contexto de la agricultura de precisión.

REPRESENTACIÓN GRÁFICA (MAPAS) Y RESUMEN NUMÉRICO DE LA INFORMACIÓN (HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS)

Antes de iniciar la descripción de los distintos elementos cuantitativos, que son utilizados con la finalidad de obtener una descripción cuantitativa de las variables que influyen sobre la calidad y rendimiento, es necesario destacar la importancia del mapeo de los datos dentro del contexto de la AP.

Sin duda, la representación gráfica de los datos tiene claras implicancias en la capacidad de entender mediante una primera aproximación cuáles son las posibles asociaciones que hay entre una determinada variable(s) y la calidad/rendimiento de un cultivo. De la misma forma, cuando ya se ha analizado la información, obteniendo determinados índices de asociación entre las variables y correlaciones de tipo espacial, la visualización de los datos en los mapas complementa dichos análisis desarrollados.

En la **Figura 8.1** se observan distintos tipos de mapas que pueden ser usados para representar un mismo conjunto de datos. Así, se puede observar un valor en particular dentro de un mapa de contornos en dos dimensiones ó "2D", en donde la línea roja representa la ubicación de los datos iguales a "42" (**Figura 8.1.a**). De igual forma, este valor (o conjunto de valores) puede ser representado en el contexto de un "histograma de frecuencias" del conjunto de datos en cuestión (**Figura 8.1.b**), la que no corresponde a una representación geográfica, pero entrega información resumida de los rangos en los cuales se concentran los valores. Finalmente, el valor puede ser representado en un mapa de superficie, o de "tres dimensiones" ("3D"), en donde dicho valor está asignado a una determinada ("altura"), al haber adicionado un eje a la representación (**Figura 8.1.e**). En la **Figura 8.1.e** se puede ver fácilmente los sectores en donde la variable varía más abruptamente. Por otra parte, la **Figura 8.1.c** muestra en la región coloreada un rango de datos (dentro del que se encuentra el valor antes mencionado), que tiene su correspondencia en **Figura 8.1.b** y en **Figura 8.1.d**, que corresponde a un "mapa de contornos". De esta forma, podemos señalar que una distribución numérica como en **Figura 8.1.b** puede encontrar un vínculo con las representaciones geográficas de la misma.

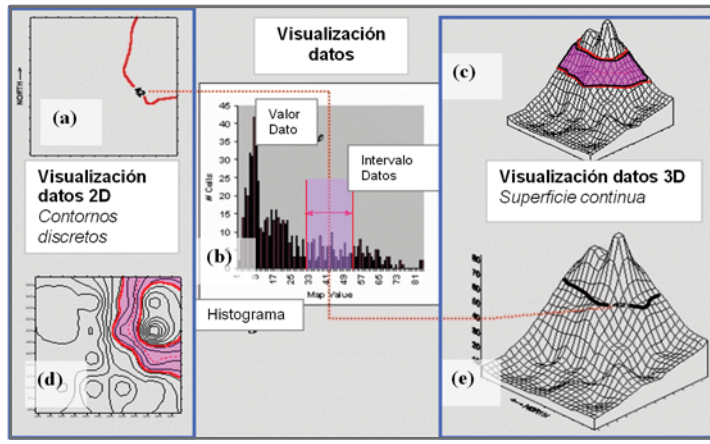


Figura 8.1: Un histograma (distribución numérica) (b) está vinculada a un mapas de superficies (a, c, d, e), ya sean estos correspondientes a representaciones bidimensionales (a, d) o tridimensionales (c, e) de la variable bajo estudio (Berry, 1999).

REPRESENTACIÓN DE MUESTREOS CONTINUOS Y DISCONTINUOS DE LAS VARIABLES

Los datos a ser representados en un mapa pueden variar en su densidad de muestreo. Tal es el caso de los datos que son tomados en terreno para análisis de propiedades físicas de suelo o de concentraciones de fósforo, por ejemplo, en donde la captura se realiza considerando distintos tipos de grillas en el terreno (**Figura 8.2**). Tomando en consideración que dichos muestreos son

puntuales dentro del terreno, por lo tanto discretos, el tipo de grilla puede variar en cuanto a su forma, siendo unas más útiles que otras. A este respecto, se ha señalado a los tipos de muestreo de grilla regular (**Figura 8.2a**) y al muestreo aleatorio (**Figura 8.2f**) como los menos adecuados para obtener un mapa de la o las variables bajo estudio.

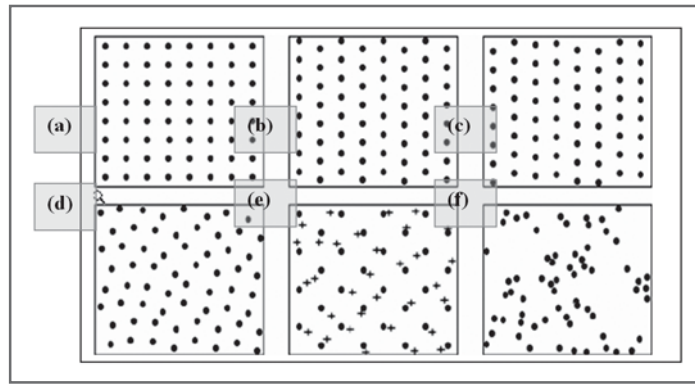


Figura 8.2: Distintos tipos de muestreo en terreno para la obtención de mapa de variables que influyen sobre el cultivo. (a) grilla regular; (b) inicio alternado; (c) inicio aleatorio; (d) sistemático no alineado; (e) agrupación aleatoria; (f) aleatoria. En las Figuras cada punto representa un dato de la variable capturado. Para llevar a un mapa una estimación de dicha variable, es necesario llenar los espacios en blanco mediante técnicas de interpolación. Por distintos motivos existe consenso en señalar a la regular y a la conformación aleatoria de los puntos muestreales (a) y (f) como los menos adecuados para obtener un mapa de la o las variables bajo estudio (Berry, 1999).

Para representar las variables de interés y cuyos datos han sido obtenidos en una forma tal como se muestra en la **Figura 8.2**, es necesario llenar los espacios que no contienen información con datos estimados o también llamados "interpolados". A su vez, para la "interpolación" de la información es condición que los valores de la variable bajo estudio se encuentren asociados espacialmente, esto es, bajo el principio que "los lugares más cercanos poseen valores más parecidos para las variables", fenómeno denominado autocorrelación. Sólo si existe esta asociación espacial o autocorrelación, tiene sentido o, más bien, es posible, desarrollar un mapa de interpolación, dado que en este caso, tendremos en dicho mapa zonas en las cuales la variable poseerá niveles más altos o más bajos. Ante ésto, se puede asociar con una o varias respuestas de calidad o rendimiento del cultivo, actuando como variable principal o en conjunto con otra variable relacionada, en cuyo caso se habla de correlación espacial entre variables explicativas.

Ahora surge la interrogante de cómo establecer en forma objetiva que una variable efectivamente presenta esta autocorrelación. En orden a responder esta cuestión es que se han desarrollado distintos índices cuantitativos, que señalan estos grados de asociación espacial para las variables bajo estudio. Dentro de los índices más empleados se encuentra el "G" o de "Geary" y el "Índice I" o "Índice de Moran", los cuales serán detallados más adelante. Tal como se señaló anteriormente, existen variables que se miden en el terreno con tecnologías que permiten obtener una gran densidad de puntos de muestreo, por lo cual la determinación de la variable ya no es tan "discreta" como en el caso anterior, si no que se hace más "continua". Un ejemplo de esto lo podemos ver en el caso de la conductividad eléctrica del suelo, al ser determinada mediante una rastra del tipo "Veris" (**Figura 8.3**).

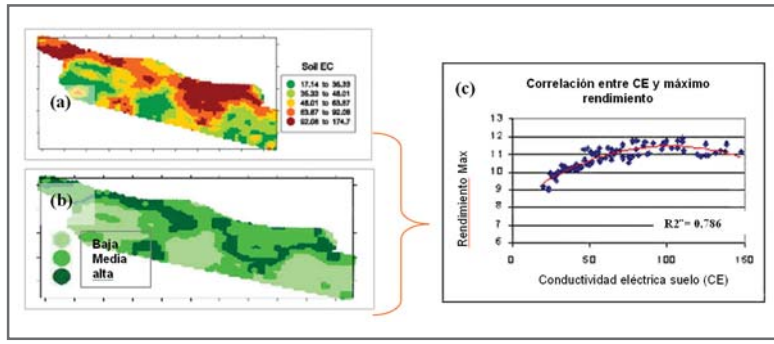


Figura 8.3: (a) Medición de la conductividad eléctrica en un cultivo con una alta densidad de puntos de muestreo (Rastra Veris); (b) Rendimiento final del cultivo; (c) Asociación entre los valores de CE y rendimiento (Lund et al., 2005)

En este caso, la asociación o autocorrelación de la variable se hace mucho más evidente que en el caso anterior, sin embargo, los tests de asociación antes descritos también han de ser aplicados en estos casos. De esta forma, en un mapa de estas características, se pueden establecer tests para visualizar asociaciones entre las variables explicativas de los distintos parámetros de calidad y rendimiento del cultivo (correlaciones entre ellas) y entre ellas el efecto final que se tiene para una o varias temporadas de cosecha. Por otra parte, no siempre es tan evidente obtener una relación entre una variable explicativa y las variables de rendimiento y calidad y es necesario usar metodologías geoestadísticas sofisticadas para poder apreciar estas asociaciones. De cualquier forma, es evidente que una densidad de datos de estas características permite un análisis más consistente de la variable medida, lo cual no siempre es posible, dependiendo de la variable en cuestión y la tecnología disponible, entre otras. Por lo anterior, es importante estudiar los métodos para la optimización de un muestreo en condiciones discretas.

Mediante las técnicas antes descritas, se pueden obtener mapas, en los cuales es posible realizar análisis sobre distintas variables bajo estudio, de tal manera que, se puede hablar de un "álgebra de mapas" (ver más adelante), pudiendo realizarse operaciones como adición, substracción y exponenciación. Así, se puede aplicar la mayor parte de las capacidades tradicionales de análisis matemático, lo cual permite realizar computacionalmente (a través de paquetes geoestadísticos especializados), un conjunto de operaciones avanzadas en análisis geoestadístico, para obtener mejor información a partir de los datos recogidos.

En este punto, es necesario señalar que hay dos condiciones fundamentales para que cualquier paquete computacional sea capaz de realizar un análisis de los datos: a) las que corresponden a una estructura consistente de datos, esto significa una organización de los mismos que permita su análisis sistemáticamente; y b) a un ambiente de procesamiento interactivo, lo que se traduce en operaciones de análisis de mapas lógicamente secuenciadas (que involucra cuatro operaciones principales, que serán revisadas más adelante). Así, se persigue que la organización de la información contenida inicialmente en formas discretas (puntos, líneas y polígonos) sean extendidas a mapas de superficie que caracterizan el espacio geográfico como continuo, organizado en una que presenta una grilla continua (**Figura 8.4.c**), pasando de un esquema de muestreo puntual (**Figura 8.4.a**). Esta estructuración es una base de trabajo para el análisis de los mapas. El trabajo de modelaje de superficie se puede apreciar en la **Figura 8.4**, en donde se ha alcanzado un mapa de superficie mediante una técnica de interpolación o modelaje, que representa una etapa intermedia (**Figura 8.4.b**) de análisis entre los datos mostrados en grilla y aquellos finalmente en mapa de superficie.

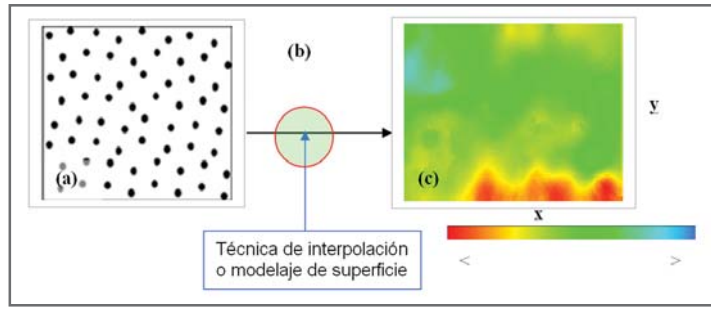


Figura 8.4: Esquema general de obtención de un mapa de superficie. (a) Datos obtenidos en grilla, según lo detallado en Figura 8.2; (b) Procesamiento de la información mediante técnica de interpolación o modelaje de superficie; (c) Mapa de superficie obtenido, mostrando las zonas en las que hay más nivel de la variable medida (>), representadas en celeste-azul y aquellas donde existe menos concentración de la misma (<), zonas representadas por tonos amarillo-rojos, mientras que los tonos verdes representan valores intermedios (Figura 8.4a, adaptada de Berry, 1999); Figura 8.4c, ejemplo de salida del software Vesper, ver 1.6.

AUTOCORRELACIÓN ESPACIAL

Como se ha señalado anteriormente, es importante saber si los datos de una variable poseen algún grado de agrupación espacial o autocorrelación. De esta manera, la autocorrelación puede ser definida como la "Correlación de una variable con respecto a si misma a través del espacio". Así, si existe cualquier patrón sistemático en la distribución espacial de una variable, se dice que está "espacialmente autocorrelacionada" (ejemplo, variable determinada en **Figura 8.4**). Ver también "Econometría Espacial", en el Capítulo 8.2.

Por otra parte, si tenemos una situación en la que las áreas adyacentes o vecinas son más parecidas, entonces podemos referirnos a "correlación espacial positiva". Por el contrario, si encontramos que los valores de áreas vecinas no son parecidos, se habla de "autocorrelación negativa". Finalmente, si la variable bajo estudio muestra un patrón aleatorio, no existe autocorrelación espacial.

La mayor parte de las estimaciones en estadística tradicional, asumen que los valores de las observaciones para cada muestra, son independientes unos de otros. En geoestadística, el concepto de autocorrelación positiva puede violar este principio, si las muestras han sido tomadas a partir de áreas adyacentes.

En Geoestadística, los objetivos de la determinación de la autocorrelación para las variables en estudio corresponden a: (i) medir la fuerza de la autocorrelación espacial dentro de un mapa; y (ii) probar el supuesto de independencia o de aleatoriedad en los datos. Si se encuentra que no hay independencia espacial, entonces muchas herramientas estadísticas e inferencias a partir de ellas, son inapropiadas.

Así por ejemplo, en el caso de los coeficientes de correlación en regresiones de mínimos cuadrados ordinarios (OLS ó RMCO), para predecir una respuesta, se asume que las observaciones han sido seleccionadas al azar. Sin embargo, si los valores de las observaciones (o si las mismas observaciones) están de alguna manera agrupadas espacialmente (tal como se ve en la **Figura 8.4c**), las estimaciones obtenidas a partir de coeficientes de correlación mediante una RMCO estarán sesgadas y con una precisión sobreestimada. Este sesgo se producirá pues las áreas con una mayor concentración de eventos tendrán un mayor impacto en el modelo de estimación, sobreestimando así la precisión, ya que habrá realmente un menor número de observaciones independientes que las que se asumen en el análisis.

ÍNDICES DE AUTOCORRELACIÓN ESPACIAL

Para cuantificar si una variable en un mapa presenta o no autocorrelación espacial, se han utilizado distintos tests de autocorrelación, los cuales se detallan a continuación:

Índice "I" de Moran

Es uno de los indicadores más antiguos de autocorrelación espacial (Moran, 1950a 1950b). Aún en la actualidad corresponde al índice estándar para la determinación de autocorrelación espacial. Se aplica a zonas o puntos con variables continuas asociadas dentro de estas zonas. Una de las particularidades de este índice es que compara el valor de la variable en cualquier punto, con el valor de todas las otras posiciones.

El índice "I" de Moran, se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$I = \frac{N\sum_i\sum_j W_{i,j}(X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{(\sum_i\sum_j W_{i,j})\sum_i (X_i - \bar{X})^2} \qquad (1)$$

donde:

N: número de casos;

Xi: valor de la variable en una posición particular;

Xj: valor de la variable en otra posición;

X: media de la variable; y

Wi,j : peso aplicado a la comparación entre la posición i y la posición j.

El índice "I" de Moran varía entre -1 y +1. Si existe una correlación espacial, los valores estarán cercanos a la unidad (positiva y negativa con valores cercanos a +1 y -1, respectivamente), mientras que si no existe correlación espacial, los valores del índice serán próximos a cero.

En la **Figura 8.5**, el valor de cada variable ("x" e "y") se encuentra asociado a un polígono, el cual muestra un color para un rango representativo de la variable. En la **Figura 8.5.a** existe una correlación espacial positiva para la variable "x", mostrando valores de polígonos asociados espacialmente (I=0,66); mientras que en la **Figura 8.5.b** no existe correlación espacial para la variable "y", mostrando los polígonos una configuración típica de "tablero de ajedrez".

Índice "C" de Geary

Este índice es similar al "I" de Moran anteriormente descrito (Geary, 1954). En este caso, la interacción no es el producto cruzado de las desviaciones de la media, si no que utiliza la desviación en intensidades de cada observación/posición con el valor de otra.

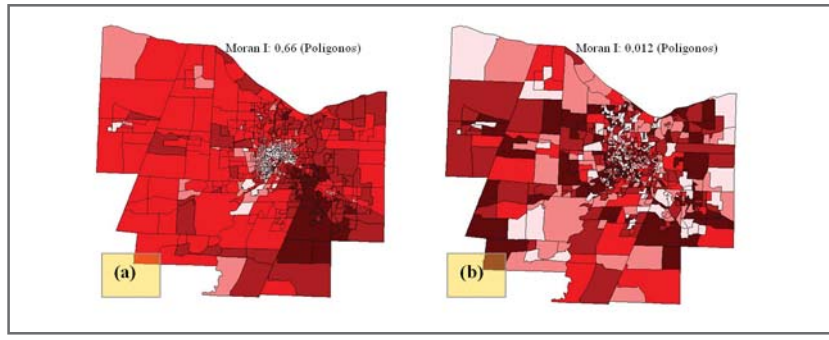


Figura 8.5: Ejemplo de variables ("x" e "y") cuyos valores presentan (a) una asociación espacial en el caso de "x", mientras que en (b) "y" presenta un patrón aleatorio de distribución de sus valores. Adaptado de Lembo, 2005.

El índice "C" de Geary, se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$C = \frac{[(N-1)[\sum_i \sum_j W_{ij}(X_i - X_j)^2]}{2(\sum_i \sum_j W_{ij}(X_i - \overline{X})^2} \qquad (2)$$

donde:

Xi: valor de la variable en una posición particular;

Xj: valor de la variable en otra posición;

X: media de la variable; y

Wij: ponderación aplicada a la comparación entre la posición i y la posición j.

Este índice varía típicamente entre 0 y 2. Si el valor de una zona en particular está espacialmente no relacionado con el valor en cualquier otra zona, entonces el valor del indicador será 1. Por otra parte, "C", está inversamente relacionado a "I". Asimismo, el test "I" proporciona un indicador más global, mientras que "C" es más sensible a las diferencias en zonas adyacentes. Finalmente, hay que destacar que para el análisis de este índice se emplea el semivariograma o variograma, el cual será explicado en el punto siguiente.

MODELAJE DE SUPERFICIE: INTERPOLACIÓN ESPACIAL

Una vez obtenidos los índices de autocorrelación (a través de los tests "I" o "C"), y habiéndose determinado que existe algún grado de asociación espacial en los valores de una variable estudiada, se pueden aplicar técnicas de modelaje de superficie para la o las variables de interés, lo que en nuestro caso estará representado por la interpolación espacial.

En esta sección se comenzará la descripción de las alternativas de análisis de modelaje para efectuar el paso mostrado en la **Figura 8.4.b**.

De esta manera, y tal como se ha mencionado en el punto anterior, el proceso de llevar los puntos discretos a una representación de superficie, o modelaje de superficie, implica la obtención de un mapa a partir de un muestreo puntual (discreto) en un mapa que representa la distribución geográfica continua de los datos. Es preciso destacar, que la estadística tradicional (no espacial) señala un supuesto fundamental en los análisis, que es que los datos están distribuidos en el espacio al azar. Por esto, si los datos presentan autocorrelación (según el concepto ya presentado), muchos de los análisis estadísticos tradicionales no presentan validez. La estadística espacial o geoestadística, por otra parte, utiliza los patrones geográficos de los datos para explicar de mejor forma su variabilidad.

Técnicas de caracterización de distribución de datos e interpolación espacial

Como ya se ha indicado, cuando se realiza un muestreo discreto la estimación de los valores en aquellos lugares donde no se ha muestreado, implica utilizar técnicas de interpolación, que finalmente nos lleva a la caracterización de la distribución de los datos en un mapa.

Hay numerosas técnicas para caracterizar o modelar (interpolar) la distribución espacial implícita en un conjunto de datos, entre otras contamos con:

- La técnica **"Nearest Neighbor"** o del "vecino más próximo", en donde se asigna el valor del punto más cercano al lugar donde se requiere realizar la estimación;
- La **"Inverse Distance to a Power— weighted"** (o IDW), corresponde al método más simple de interpolación, en el cual se realiza un promedio de las muestras en una ventana de resumen, de tal manera que la influencia de un punto de muestreo declina con la "simple" distancia cuadrática, desde un valor desconocido hasta valores conocidos (**Figura 8.6**).

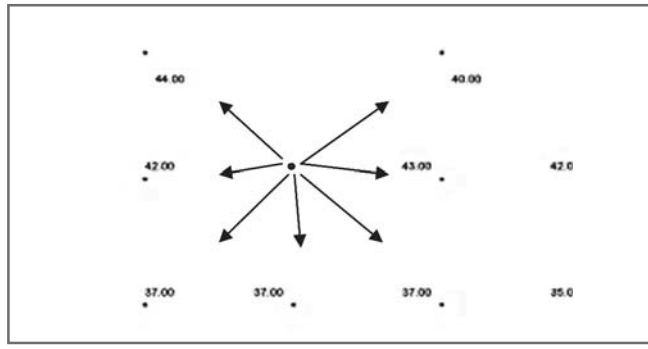


Figura 8.6: Esquema de operación de la interpolación por la metodología de la distancia inversa.

Por otra parte, también es necesario considerar los siguientes métodos:

- **"Modified Shepard's Method"** o Método Modificado de Shepard, en donde se utiliza un método de "mínimos cuadrados" de distancia inversa, el cual presenta la ventaja de reducir el efecto de "ojos de buey" alrededor de los puntos de muestreo, que generalmente se presentan con el modelo de IDW;
- **"Radial Basis Function"**, en donde se utilizan funciones no lineales de "distancia simple" para determinar la ponderación;

- **"Natural Neighbor-weighted"**, promedio de las muestras adyacentes, en donde las ponderaciones son proporcionales al área a partir de los puntos adyacentes, lo cual está basado en la diferencia de los conjuntos de polígonos de Thiessen (**Figura 8.7**);

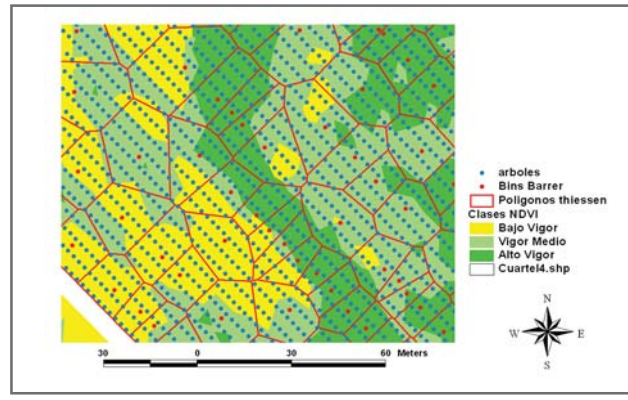


Figura 8.7: Aplicación de polígonos de Thiessen para determinar áreas de influencia de cosecha.

- **"Método de triangulación",** identifica el conjunto óptimo de triángulos o facetas que conectan todos los puntos de muestreo. Luego de este procedimiento se hace una transformación a una grilla;
- **"Método de curvatura mínima"**, el cual es análogo al ajustar una fina placa elástica entre cada punto de muestreo, minimizando el doblamiento de la misma; y
- **"Regresión polinomial"**, en este método se ajusta una ecuación al conjunto completo de puntos de muestreo (lo cual no es verdaderamente una interpolación, si no que es un procedimiento de generalización de mapa).

Variograma

Una de las herramientas ampliamente utilizadas para la descripción espacial de los conjuntos de datos corresponde al variograma o semivariograma. A su vez, este procedimiento geoestadístico es de gran importancia para la determinación de una de las mejores técnicas de interpolación utilizadas, la que corresponde al método de *kriging*. El variograma es una descripción matemática de la relación entre la varianza entre pares de observaciones (puntos de datos) y la distancia que separa esos puntos (h). Una representación gráfica típica de un variograma lo podemos observar en la **Figura 8.8.**

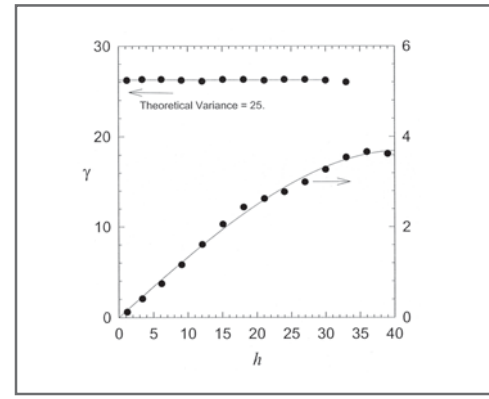


Figura 8.8: Representación de un variograma, en donde la varianza teórica del conjunto de datos es igual a 25. La curva ajustada minimiza la varianza de los errores.

Los valores del variograma se calculan mediante la siguiente expresión:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \left[Z(x_i) - Z(x_i + h) \right]^2 \qquad (3)$$

donde:

h: distancia que separa los puntos muestreados;

N(h): Número de pares de datos, separados por la distancia h; y

x_i: Posición de datos en donde h=0.

Si en un conjunto de datos, para cada punto de medición realizamos un variograma para una dirección definida, encontramos la relación entre dicho punto y aquellos más distantes (**Figura 8.9**).

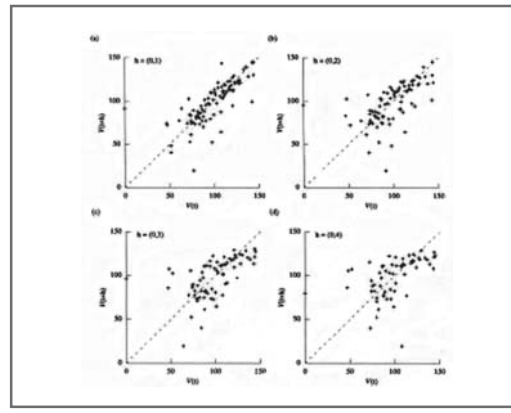


Figura 8.9: Gráficas scatterplot comparativas para valores iniciales (h = 0), incrementando en cada una un valor de h o distancia. Se aprecia que a medida que se aleja del punto inicial h = (0,0) hacia h = (0,4), la dispersión de los datos en torno a la diagonal se incrementa.

A continuación se presentan varias características o componentes relevantes en un variograma, que pueden ser apreciadas en la **Figura 8.10.a**, para un modelo particular de variograma:

- **Varianza de nugget:** se presenta cuando existe un valor distinto de cero en $\gamma(h)$, para h=0, el cual es producido por varias fuentes de error desconocidas (por ejemplo errores de medición);
- **Sill:** punto en donde el variograma alcanza su tope, que es equivalente a la varianza del conjunto de datos y en donde ya no existe correlación entre los pares de puntos;
- **Rango:** es el valor de h hasta donde el "Sill" se presenta (o el 95% del mismo);
- En general se necesitan 30 o más pares por punto para desarrollar un variograma de muestreo;
- La parte más importante característica del variograma es su forma cerca del origen, dado que los puntos más cercanos otorgan los valores de peso más alto para el proceso de interpolación.

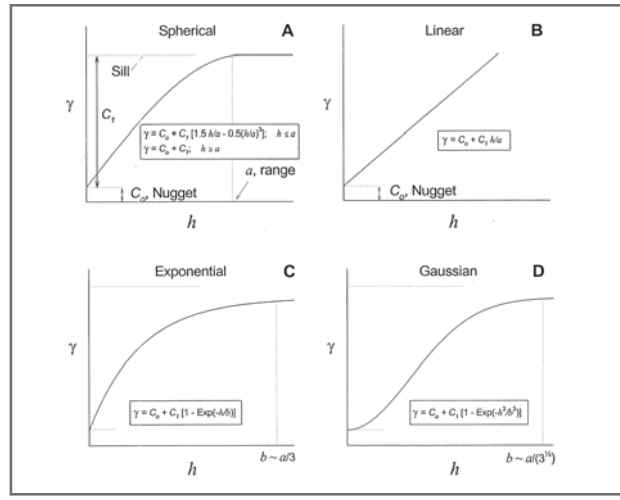


Figura 8.10: Principales modelos de variograma: (A) esférico; (B) linear; (C) exponencial; (C) Gaussian. A su vez, en el variograma (A) se aprecian los principales componentes del mismo. Se muestran las ecuaciones que relacionan h a γ en cada modelo.

Modelos de Variograma

Los modelos de variograma deben ser positivamente definidos, de tal manera que la matriz de covarianza en estos puedan ser invertidas (lo cual ocurre dentro del proceso de *kriging*). A causa de esto, sólo algunos modelos pueden ser empleados.

Anisotropía

Otra de las propiedades encontradas en los variogramas, se refiere a la anisotropía, en donde se constata que puede haber una mayor autocorrelación espacial en una dirección que en otras (**Figura 8.11**).

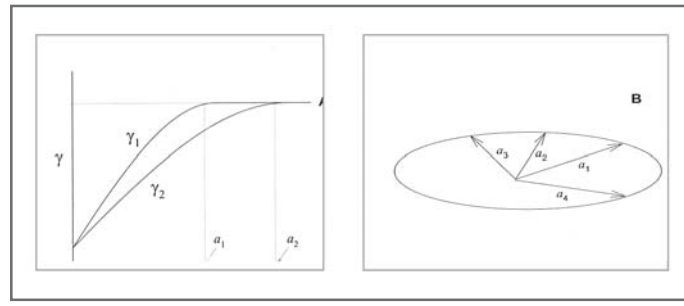


Figura 8.11: Caso de anisotropía geométrica para un modelo de variograma esférico (A). En (B) se pueden apreciar las direcciones para a_1 y a_2

La autocorrelación espacial determinada mediante los métodos antes señalados y utilizando el variograma, corresponde a información que es empleada para el proceso de estimación de zonas no muestreadas, lo cual corresponde a inferencia. A continuación se presenta uno de los métodos más empleados de inferencia, que corresponde al *kriging*.

Kriging

La técnica de interpolación del *kriging* está basada en la idea de que se pueden desarrollar inferencias considerando una función aleatoria Z(x), dados los puntos Z(x1), Z(x2), …Z(xn).

La expresión matemática de lo señalado anteriormente es:

$$Z(x) = m(x) + \gamma(h) + \varepsilon'' \qquad (4)$$

En la ecuación 4 se pueden distinguir tres componentes fundamentales: un componente estructural (m(x)), un componente aleatorio correlacionado espacialmente (γ(h)) y un error residual (ε").

Es importante señalar que a través de otra técnica, el "*co-kriging*", se puede obtener el valor de una variable a través de la estimación de otras correlacionadas (por ejemplo, en el caso de densidad de suelo y humedad del mismo).

En la **Figura 8.12** se presenta un esquema de la obtención de un mapa por medio de *kriging*, utilizando un programa geoestadístico.

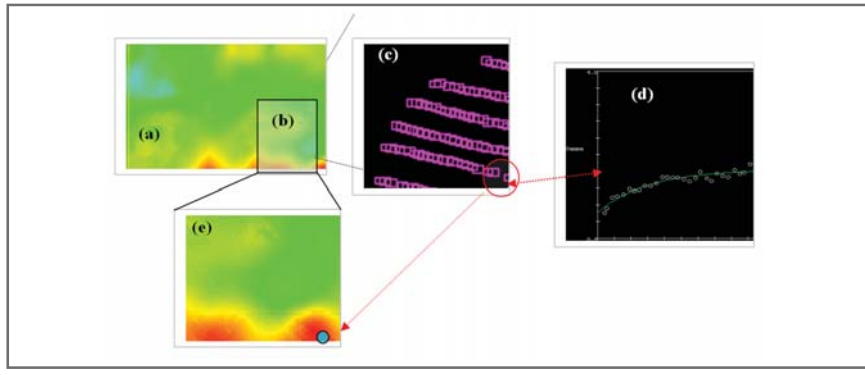


Figura 8.12: Ejemplo procesamiento (proceso b de la Figura 8.4) de datos en programa geoestadístico para realización de *kriging*, en donde se puede apreciar (a) mapa definitivo obtenido mediante variograma; (b) zona considerada en análisis *kriging* para la estimación del punto en turquesa; (c) puntos considerados para la estimación del punto desconocido; (d) variograma para determinar los pesos de los valores que serán considerados en la interpolación final; (e) punto interpolado, zona ampliada del mapa.

Si se comparan los resultados entre dos métodos de interpolación tales como el IDW y el método de *kriging*, tomando como base el mismo conjunto de datos, se pueden observar diferencias como las que se muestran el la **Figura 8.13.**

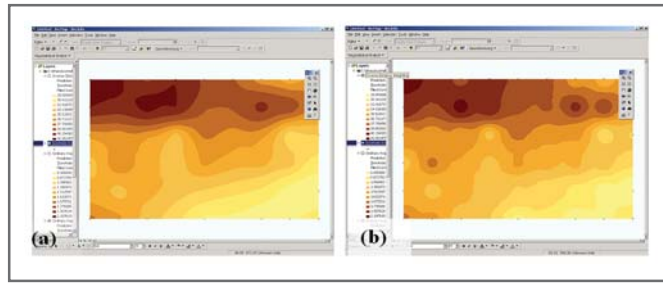


Figura 8.13: Comparación del resultado de planos realizados mediante (a) kriging y (b) IDW

De esta manera, según los resultados mostrados anteriormente, podemos señalar que: (a) el método de *kriging* aparece en su representación de los datos en el mapa (**Figura 8.13.a**) con resultados más "naturales", evitando el efecto de "ojo de buey" que se observa alrededor de algunos puntos en el mapa desarrollado mediante IDW (**Figura 8.13.b**).

Por otra parte, en el **Cuadro 8.1**, se presenta una comparación entre los distintos métodos, en donde el método de *kriging* muestra ser el mejor.

Cuadro 8.1: Descripción de resultados de ensayos utilizando métodos de IDW, variograma y *kriging*.

	Estadística Descriptiva	IDW	Variograma	Kriging
Media	36,3	39,9	37	41,2
Límites Conf.	30 - 42	34.7 - 45	32 - 42	37.6 - 44.6
Rango	- 12	- 10,3	- 10	- 7

Caracterización del error en la interpolación espacial

A continuación se dará a conocer un tipo de mapa de gran utilidad para identificar las zonas donde la estimación por interpolación ha sido más o menos satisfactoria, mostrando las zonas con sobreestimación o subestimación en relación a los valores de muestreo conocidos (*crossvalidation*). A este tipo de mapa se le denomina "mapa de error" o "mapa de los residuales" (valor residual = valor observado-valor estimado) para la interpolación. En este caso, los valores residuales obtenidos son nuevamente interpolados por *kriging* para obtener un mapa de error (**Figura 8.14**).

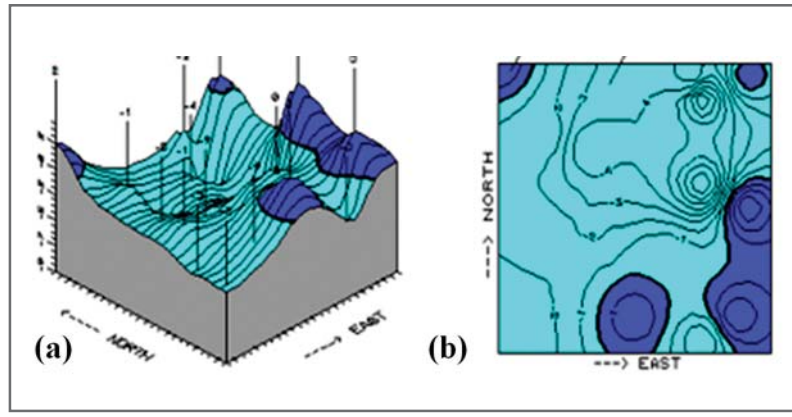


Figura 8.14: Mapas de error o de residuales (a) 3D; (b) 2D, en donde en la zonas azules se muestra una sobreestimación de los valores y en las zonas turquesa se observa una subestimación de las mismas.

CONDICIONES FUNDAMENTALES PARA EL ANÁLISIS DE MAPAS

Tal como se señaló anteriormente, hay dos condiciones fundamentales para que cualquier paquete computacional sea capaz de realizar un análisis de los datos, las que corresponden a (i) una estructura consistente de datos; y (ii) a un ambiente de procesamiento iterativo, lo que involucra cuatro operaciones principales:

- Recuperación de una o más capas de mapa desde una base de datos;
- Procesamiento de los datos, según especificaciones del usuario;
- Creación de un nuevo mapa conteniendo los resultados del proceso; y
- Almacenaje del nuevo mapa en una base de datos para posteriores.

Un ejemplo de lo anterior puede se aprecia en la **Figura 8.15**.

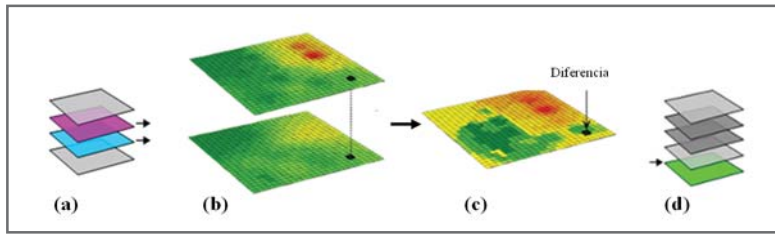


Figura 8.15: Ejemplo de un medioambiente iterativo de procesamiento, usado para derivar nuevas variables de mapa: (a) Recuperación de capas de mapa desde una base de datos; (b) Procesamiento de los datos, en este caso se combinan celdas específicas, para obtener una diferencia; (c) Nuevo mapa creado, en donde la celda resultado se indica con una flecha; (d) Almacenaje del nuevo mapa en base de datos (Berry, 1999).

VISUALIZACIÓN DE LAS VARIABLES ESPACIALES

Una distribución multivariada puede ser expuesta en representaciones de dos y tres dimensiones que permiten describir, por ejemplo, la distancia entre los puntos en un gráfico de tres dimensiones, determinando la similitud relativa en los patrones de datos (**Figura 8.16**). En esta gráfica cada eje representa la cantidad de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), presentes en un cultivo bajo riego por pivote central (**Figura 8.16.a**).

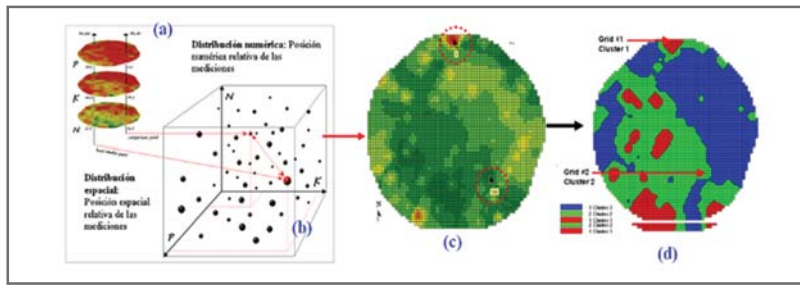


Figura 8.16: Visualización de las variables espaciales para un suelo de cultivo en pivote central, (a) distribución espacial concentraciones de N, P y K donde se han elegido dos puntos de comparación; (b) diagrama 3D, de distribución numérica; (c) mapa de similitud para los puntos en estudio; (d) mapa de agrupamiento o "clustering" de los valores

En la **Figura 8.16.b** se puede señalar que los valores puntuales en rojo son los poco parecidos, si se realiza una comparación numérica, ya que están muy alejados en la gráfica. La distancia relativa entre estos puntos de comparación (muy alejados) y todos los demás otorga un valor numérico de "índice de similitud", el cual es graficado en la **Figura 8.16.c**, en donde los tonos verdes indican localizaciones con cantidades similares de N, P y K y los tonos rojos indican áreas con concentraciones diferentes de estos nutrientes. Finalmente, en la **Figura 8.16.b**, grupos de puntos "flotantes" adyacentes, sirven para la identificación en el campo de zonas con similares patrones o zonas de datos, lo cual da pie a la aplicación de distintas medidas de manejo a estas diferentes "zonas de datos".

Es necesario remarcar que los datos que exhiben una alta dependencia espacial, y que son representados en los mapas, sirven para crear funciones de predicción robustas, lo cual, a su vez es necesario para predecir la rentabilidad del cultivo o establecer las medidas de manejo necesarias. Lo anterior, a diferencia de la estadística tradicional, hace posible localizar los lugares en donde estos manejos optimicen dichos manejos y, con ello, la rentabilidad.

REFERENCIAS

Berry, J.K. 1999. The Precision Farming Primer. http://www.innovativegis.com/basis/pfprimer/ (Accessed December 16, 2005).

Geary, R. 1954. The contiguity ratio and statistical mapping, The Incorporated Statistician 5, 115-45.

Lembo, A. 2005. Spatial Modeling and Analysis. Spatial Autocorrelation. Dept. of Crop and Soil Sciences, Cornell University. http://www.css.cornell.edu/courses/620/lecture9.ppt#1 (Accessed December 16, 2005)

Lund, E. D.; Christy, C. D. y Drummond. P. E. 2000. Using Yield and Soil Electrical Conductivity (EC) Maps to Derive Crop Production Performance Information. Presented at the 5th International Conference on Precision Agriculture 2000. (Accessed December 16, 2005) http://www.veristech.com/pdf_files/EC_yld_analysis%20paper_5thconf.pdf

Minasny, B., McBratney, A.B., y Whelan, B.M., 2005. VESPER version 1.62. Australian Centre for Precision Agriculture, McMillan Building A05, The University of Sydney, NSW 2006. (http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa)

Moran, P. A. P. 1950a. Notes on continuous stochastic phenomena. Biometrika 37, 17–23.

Moran, P. A. P. 1950b. A test for the serial dependence of residuals. Biometrika 37, 178–181.

Vesper (Variogram Estimation and Spatial Prediction plus ERror). 2005. Australian Centre for Precision Agriculture (ACPA). http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa/vesper/vesper.html (Accessed December 16, 2005).

8.2. ECONOMETRÍA ESPACIAL

Rodolfo Bongiovanni
rbongiovanni@correo.inta.gov.ar
INTA Manfredi, Argentina

INTRODUCCIÓN

La Econometría es la parte de la ciencia económica que aplica las técnicas matemáticas y estadísticas a las teorías económicas, para su verificación y solución de los problemas económicos mediante modelos. Por su parte, la Econometría Espacial es una especialidad dentro de la Econometría que se ocupa del tratamiento de la interacción espacial (autocorrelación espacial[1]) y de la estructura espacial (heterocedasticidad[2]) en los modelos de regresión (Anselin, 1999). Esta especialidad es similar a la Geoestadística (descripta en el Capítulo 8.1) y a la Estadística Espacial, las que forman parte del conjunto de herramientas metodológicas de las que disponen los investigadores. Sin embargo, la Econometría Espacial difiere de la Estadística Espacial de la misma forma en que la Econometría difiere de la Estadística en general. Esta distinción se basa en el rol central que se le atribuye al modelo teórico en vez de los datos, al momento de determinar los tipos de especificaciones que interesan.

En los últimos años, se ha dado una explosión en la aplicación de modelos espaciales en las ciencias sociales, en general, y en la economía agraria, en particular, incluyendo la agricultura de precisión (Anselin et al., 2004; Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer, 2000). Por otra parte, la difusión generalizada de los sistemas de información geográfica (GIS) generó la necesidad de una metodología que permita manejar modelos espaciales, ya que las técnicas econométricas tradicionales por lo general no funcionan en la presencia de autocorrelación espacial, algo muy común en datos georeferenciados.

Anselin (1988) define la Econometría Espacial como "la colección de técnicas que se ocupan de las peculiaridades causadas por el espacio en el análisis estadístico de modelos". Esta tiene cuatro áreas de interés: (a) la especificación formal de efectos espaciales en modelos econométricos; (b) la estimación de modelos que incorporan efectos espaciales; (c) los tests de especificación y de diagnóstico para detectar la presencia de efectos espaciales; y (d) la predicción espacial (interpolación).

1 **Auto-correlación espacial** es una extensión de la correlación temporal a un espacio en dos dimensiones. Este es un tema de creciente importancia que surge con el análisis en sistemas de información geográfica (GIS) de los recursos naturales y del medio ambiente (ver Anselin y Bera 1998; Anselin 2001a, b). Específicamente, la auto-correlación espacial o dependencia espacial se presenta cuando en una regresión, la variable dependiente o el error en un punto se correlaciona con la variable dependiente o el error en otros puntos del lote. Formalmente, se expresa como: $E[y_i y_j] = 0$, ó, o $E/\varepsilon_i \varepsilon_j/ \neq 0$ para los puntos vecinos *i* y *j*, donde *i* y *j* se refieren a observaciones individuales y donde $y_{(i)}$ es el valor de la variable de interés (Anselin, 1992). La auto-correlación espacial en el caso de los datos de rendimiento se presenta como la similitud de valores para ubicaciones similares. Es decir, los valores altos o bajos de rendimiento tienden a estar rodeados de observaciones vecinas con valores similares. Por lo tanto, y debido a que los valores de los factores de rendimiento en un punto del lote dependen de los valores en otros puntos del lote, los datos de este lote van a presentar auto-correlación espacial. La presencia de auto-correlación espacial implica que una muestra contiene menos información que una que no está auto-correlacionada (Anselin y Bera, 1998). Para que la regresión sea estadísticamente significativa, se tiene que corregir esta auto-correlación espacial, de modo tal que los estimadores obtenidos permitan realizar cálculos económicos con precisión.

2 **La heterocedasticidad** ocurre cuando la varianza del término error no es constante para todos los valores de la variable independiente de interés (es decir, no es homocedástica). Consecuentemente, el valor de la precisión de una regresión OLS es incorrecto, porque OLS asume un término de error con varianza constante. Los estimadores OLS no están sesgados, pero ya no son los más eficientes. Más importante todavía, los tests estadísticos *t* y *F* van a indicar otra cosa (en otro sentido) y la R^2 va a ser incorrecta. Es muy frecuente encontrar este problema en el análisis espacial de datos, especialmente cuando se usan datos de unidades espaciales irregulares (con diferente superficie), cuando hay diferencias sistemáticas en las relaciones que se están modelando (ej.: regímenes espaciales como tipos de suelo o topografía), o cuando hay una desviación espacial en los parámetros del modelo (ej.: expansión espacial). Si un modelo de regresión espacial convencional ignora la presencia de cualquiera de estos efectos espaciales, produce un problema de mala especificación. Por lo tanto, si hay indicios de heterocedasticidad, es necesario incorporar explícitamente los efectos espaciales, ya sea como regímenes espaciales, ya sea como una expansión espacial de los parámetros. Hay muchos tests de heterocedasticidad, y todos parten de la hipótesis nula de homocedasticidad: $\mathbf{H_0}: E[\varepsilon_i^2] = \sigma^2$. La hipótesis alternativa es que el término error de cada una de las observaciones tiene una varianza diferente: $\mathbf{H1}: E[\varepsilon_i^2] \neq \sigma^2$.

ECONOMETRÍA ESPACIAL VERSUS GEOESTADÍSTICA

La econometría espacial se distingue de la geoestadística en sus supuestos básicos, el objetivo de la geoestadística es estimar superficies. La geoestadística asume que la variación espacial es un proceso continuo, que da por resultado una «superficie» de observaciones espaciales. La principal herramienta es el semivariograma. Por el contrario, la economía espacial está orientada hacia la estimación y la comprobación de hipótesis. Asume que la covarianza espacial es una interacción entre objetos espaciales discretos (polígonos o cuadrículas). Esto requiere la especificación de un proceso estocástico espacial con una estructura de observaciones contiguas (la matriz de ponderadores espaciales). La econometría espacial se usa mucho en economía regional, epidemiología y criminología. En agricultura de precisión, el análisis econométrico espacial se aplica a datos espaciales de estructura similar, pero con mayor resolución que la usada en las ciencias sociales o médicas (ej.: polígonos del ancho del cabezal de la cosechadora en vez de divisiones geográficas). Ver Anselin (2001a) y Lambert et al. (2004) para una discusión sobre las diferencias entre estas dos ciencias.

ANÁLISIS DE REGRESIÓN EN GENERAL

El análisis de regresión es una de las herramientas usadas en Econometría. El objetivo primordial es estimar el valor de una variable aleatoria (la variable dependiente, el rendimiento), dado que los valores de una o más variables asociadas (la o las variables independientes, dosis de N, tipo de suelo, elevación, etc.) son conocidos. La ecuación de regresión es la fórmula algebraica por la cual se determina el valor estimado de la variable dependiente o de respuesta:

$$Y_i = \alpha + \beta_1 X_i + \beta_2 X_i^2 + \varepsilon_i \qquad (1)$$

donde:

Y_i = Valor de la variable dependiente en la observación i, ej.: rendimiento del maíz (kg/ha) por cada punto i del monitor de rendimiento;

α = Primer parámetro de la ecuación de regresión, que indica el valor de Y cuando X = 0, ej.: el rendimiento del maíz cuando el N aplicado es cero;

β_1 = Estimador lineal o pendiente de la línea de regresión. Ej.: el aumento de rendimiento por cada kg/ha de N elemental que se aplica desde cero;

β_2 = Estimador cuadrático de la línea de regresión. Es el coeficiente que captura los rendimientos decrecientes, es decir, la tendencia del N a producir menores y menores incrementos de rendimiento con niveles más y más altos de N;

X_i = Valor especificado de la variable independiente en el ensayo u observación i. Ej.: cantidad de N elemental aplicado por franjas (kg/ha); y

ε_i = Error de muestreo aleatorio en el ensayo u observación i.

¿POR QUÉ USAR REGRESIÓN ESPACIAL?

Los monitores de rendimiento están en el mercado desde hace unos quince años, pero ha sido difícil encontrar la relación entre los rendimientos y las condiciones del cultivo (ej.: análisis de suelo, aplicación de insumos, topografía, etc.). Los análisis de rentabilidad realizados en otros países indican que la DV de fertilizantes en cultivos extensivos no es rentable. Una hipótesis sobre esta falta de rentabilidad es que para realizar DV se están usando las mismas recomendaciones de fertilización que existen para dosis uniforme, las que no reflejan las diferencias de respuesta sitio-específica, porque se basan en ensayos de parcelas realizados en diversas estaciones experimentales de una amplia área de influencia. Por diseño, se omiten las características específicas de cada sitio, lo que las desacredita para prescribir aplicaciones sitio-específicas de insumos. El problema clave, tanto para el análisis de rentabilidad como para la estimación de la respuesta sitio-específica es que no se ha tenido debidamente en cuenta la estructura espacial de los datos georeferenciados.

Los rendimientos del cultivo se deben a una respuesta a los insumos que se aplican, a las características predeterminadas del sitio y a los factores climatológicos aleatorios (Bullock y Bullock, 2000). Nunca es posible incluir todas las variables relevantes de la respuesta del rendimiento de un cultivo en un modelo de regresión. Se sabe que la omisión de variables relevantes reduce la eficiencia estadística de los modelos de estimación, y peor aún, si las variables que se omiten están correlacionadas con las variables que se incluyen en un modelo, los estimadores pueden estar sesgados (Griliches, 1957). Dado que los estimadores de insumos aplicados se usan para desarrollar las recomendaciones de fertilización, el sesgo estadístico de dichos estimadores puede ocasionar costosos errores.

Las características de cada sitio representan un grupo importante de variables que tienden a ser omitidos en los modelos de respuesta agronómica de rendimiento. Por definición, estas variables están distribuidas espacialmente y los sitios que están más cerca entre sí tienden a ser más parecidos que los sitios que están más separados. Por lo tanto, aún cuando se omitan variables sitio-específicas relevantes de un modelo de regresión espacial, puede haber una correlación en esas variables omitidas con los sitios que las rodean. La regresión espacial proporciona herramientas para diagnosticar y tratar los casos de correlación espacial.

CÓMO USAR LA REGRESIÓN ESPACIAL

Los modelos de regresión espacial se pueden dividir en dos grupos, de acuerdo a la forma de dependencia espacial que haya entre las observaciones (Anselin, 1995): modelos de ponderación espacial y modelos de error espacial.

En modelos de ponderación espacial, la variable dependiente está correlacionada espacialmente de la siguiente forma:

$$\boldsymbol{y} = \rho \boldsymbol{W y} + \boldsymbol{X}\beta + \varepsilon \qquad (2)$$

donde:

y es un vector (n por 1) de observaciones de la variable dependiente;

ρ es el coeficiente auto regresivo;

Wy es el vector de variables independientes ponderado por una matriz W de observaciones vecinas;

X la matriz de observaciones de las variables independientes (n por K); y

ε es el error de muestreo.

En el modelo de error espacial, la variable dependiente no está correlacionada por sí misma, sino que es el error de muestreo aleatorio el que está correlacionado:

$$y = X\beta + \varepsilon \qquad (3)$$

$$y = \lambda W\varepsilon + \mu$$

donde:

μ es el error de muestreo aleatorio que sigue una especificación auto regresiva espacial (SAR) con un coeficiente auto regresivo λ.

Ambos tipos de auto correlación espacial se pueden corregir estimando los coeficientes de correlación espacial, lo que requiere el uso de una matriz de ponderadores espaciales W, que aplica una fórmula de ponderación de datos directamente relacionada a la contigüidad entre observaciones.

APLICACIONES EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Existen varios ejemplos en idioma castellano de la aplicación de la Econometría Espacial a la Agricultura de Precisión, como así también con protocolos para su uso, en la carpeta Análisis Económico del sitio www.agriculturadeprecision.org/articulos/analecon.htm.

También, se puede acceder a cuantiosos trabajos realizados a través del portal gratuito de la Universidad de Minnesota: http://agecon.lib.umn.edu/cgi-bin/view.pl.

Otra fuente importante de información son las actas de la International Conference on Precision Agriculture que se realiza cada dos años en Minnesota, así como el Journal Precision Agriculture: http://springerlink.metapress.com/app/home/, al que se puede acceder gratuitamente desde Instituciones y Bibliotecas adheridas.

Por otra parte, en el sitio del CSISS, Centro de Ciencias Sociales Espacialmente Integradas (http://www.csiss.org/), financiado por la Academia Nacional de Ciencias, existen numerosas herramientas y recursos para el adecuado tratamiento de los datos georeferenciados. Su misión es cultivar una visión integral sobre la investigación científica que reconozca la importancia de la ubicación, el espacio y el lugar. Dentro de sus productos, se encuentra el software de Econometría Espacial GeoDa, que se puede descargar gratuitamente de: http://www.csiss.org/clearinghouse/GeoDa/. Este software funciona como un GIS y como un paquete de análisis econométrico al mismo tiempo. Este sitio provee además material bibliográfico, otros programas de análisis espacial, cursos de capacitación, herramientas de búsqueda especializada, etc.

REFERENCIAS

Anselin, L. 1988. Spatial Econometrics: Methods and Models. Dordrecht: Kluwer. Academic Publishers.

Anselin, L. 1992. SpaceStat Tutorial. A Workbook for Using SpaceStat in the Analysis of Spatial Data. National Center for Geographic Information and Analysis, University of California, Santa Barbara, CA.

Anselin, L. 1999. Spatial Econometrics. Staff paper. Bruton Center, School of Social Sciences, University of Texas at Dallas, Richardson, TX 75083-0688. 31 pp.

Anselin, L. 2001a. "Spatial Effects in Econometric Practice in Environmental and Resource Economics", American Journal of Agricultural Economics 83 (3) 705-710.

Anselin, L. 2001b. "Spatial Econometrics". In: B. Baltagi (ed.), A Companion to Theoretical Econometrics. Oxford: Basil Blackwell, pp. 310-330.

Anselin, L. y Bera, A. 1998. "Spatial Dependence in Linear Regression Models with an Introduction to Spatial Econometrics." In: A. Ullah and D. Giles (eds.), Handbook of Applied Economic Statistics. New York: Marcel Dekker, pp. 237-289.

Anselin, L.; Bongiovanni, R. y Lowenberg-DeBoer, J. 2004. A Spatial Econometric Approach to the Economics of Site-Specific Nitrogen Management in Corn Production. American Journal of Agricultural Economics. Amer. J. Agr. Econ. 86(3) (August 2004): 671–683. American Agricultural Economics Association (AJAE).

Anselin, L. 1995. SpaceStat, A Software Program for the Analysis of Spatial Data, Version 1.80 and SpaceStat Version 1.80 User's Guide. Regional Research Institute, West Virginia University, Morgantown, WV.

Bongiovanni, R. y Lowenberg-DeBoer, J. 2000. "Nitrogen management in corn using site-specific crop response estimates from a spatial regression model." In: Robert, P., Rust, R. and Larson, W. eds., 2001. Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture. July 16-19, 2000. Bloomington, MN. (ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin, 2001). Pdf file 19.

Bongiovanni, R. y Lowenberg-DeBoer, J. 2001. "Precision Agriculture: Economics of Nitrogen Management in Corn Using Site-specific Crop Response Estimates from a Spatial Regression Model". Selected Paper: American Agricultural Economists Association Annual Meeting, Chicago, Illinois, August 5-8, 2001. http://agecon.lib.umn.edu/cgi-bin/view.pl

Bongiovanni, R. y Lowenberg-DeBoer, J. 2001a. "Precision Agriculture: Economics of Nitrogen Management in Corn Using Site-specific Crop Response Estimates from a Spatial Regression Model". Selected Paper: American Agricultural Economists Association Annual Meeting, Chicago, Illinois, August 5-8, 2001. http://agecon.lib.umn.edu/cgi-bin/view.pl

Bullock, D.S. y Bullock, D.G. 2000. "From Agronomic Research to Farm Management Guidelines: A Primer on the Economics of Information and Precision Technology". Precision Agriculture 2(1): 71-101.

Griliches, Z. 1957. "Specification Bias in Estimates of Production Functions". Journal of Farm Economics 39(1): 8-20.

8.3. ANÁLISIS DE CLUSTER Y CART

Álvaro Roel
aroel@tyt.inia.org.uy
Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay

ANÁLISIS DE CLUSTERS (GRUPOS)

El término análisis de clusters agrupa a una serie de algoritmos de clasificación. Una pregunta que muchas veces se realizan investigadores de diferentes áreas es: ¿cómo organizar bases de datos en estructuras que tengan una utilidad? Para este tipo de preguntas es que comúnmente se utiliza el análisis de grupos o clusters.

Básicamente, el análisis de "clusters" consiste en una serie de algoritmos que lo que realizan es el agrupamiento de datos en grupos. Normalmente, estas técnicas son utilizadas cuando no tenemos a priori ninguna hipótesis referente al problema en estudio y se está en la etapa de exploración de datos.

El rol de estas técnicas es el agrupamiento de los datos en "clusters" teniendo en cuenta algún tipo de medición de similitud dentro de los grupos conformados y de diferencia entre los mismos. El algoritmo se optimiza buscando la conformación de diferentes grupos, de manera tal, de minimizar la varianza dentro de los grupos y maximizar la varianza entre los grupos, moviendo datos de un grupo a otro.

Una aplicación de esta técnica en agricultura de precisión ha sido en la delimitación de zonas de comportamiento productivos diferentes dentro de una chacra o lote (Roel y Plant, 2004a). Muchas veces sucede que, cuando se posee una serie de mapas de rendimiento de una misma chacra, el productor o técnico desea analizar cuales fueron las zonas de la chacra que rindieron en forma aceptable y cuales tuvieron un comportamiento deficiente. Esto, que tal vez se obtenga simplemente mirando una serie de mapas de rendimiento, puede llegar a ser muy complejo cuando se tiene comportamientos erráticos o serie muy grande de mapas. La delimitación de zonas con comportamientos productivos diferentes de una serie de mapas constituye el entendimiento de la variabilidad espacial y temporal del rendimiento dentro de la misma. Este es uno de los primeros pasos que deben estudiarse dentro de una chacra o lote cuando se intentan implementar estrategias de AP en la misma. Es por lo tanto fundamental, contar con un método objetivo que permita realizar estas delimitaciones y no puede quedar al "buen ojo" del investigador, por esto consideramos importante el uso de estas técnicas estadísticas. En este caso, se debe inicialmente proceder a la estandarización de los rendimientos de las diferentes zafras, de manera de poder hacer comparación entre ellos. Paso seguido, se procede a correr el algoritmo descrito. Hoy en día, la mayoría de los paquetes estadísticos cuentan con la opción del análisis de grupo o cluster.

CART

Los árboles de calcificación y regresión (CART, del inglés Classification And Regression Trees, Breiman et al. 1984) son modernas técnicas estadísticas que permiten tanto modelar como explorar la existencia de múltiples relaciones causa-efecto, tanto en el tiempo como en el espacio, dentro de una misma base de datos. A diferencia de las técnicas normalmente utilizadas en los análisis estadísticos tradicionales, donde lo que se intenta es buscar un modelo general de relación entre

variables explicativas y de respuesta, CART divide en forma sucesiva el espacio multidimensional generado por las variables explicativas entre zonas que son lo más uniformes posibles en términos de la variable de respuesta. En vez de identificar una sola estructura dominante en la base de datos, lo que comúnmente realizan la mayoría de las técnicas estadísticas tradicionales, CART está diseñado para trabajar con base de datos que puedan tener múltiples estructuras a diferentes escalas espaciales y temporales (Roel y Plant, 2004b). Esto, lo hace sumamente útil en el caso de las aplicaciones en la agricultura de precisión donde muchas veces dentro de una misma chacra o lote pueden existir una serie de variables explicando la variabilidad de rendimiento a diferentes niveles y zonas dentro de la misma.

CART, es hoy, uno de los métodos más utilizados en medicina para intentar relacionar la presencia de síntomas en pacientes con una serie muy amplia de factores predisponentes (historia clínica). Es también comúnmente utilizado, en aplicaciones meteorológicas; en estudios de biodiversidad de especies; en general, cuando existen base de datos que contengan una serie amplia de variables observadas.

CART es un método no-paramétrico, lo que de alguna manera flexibiliza el problema que muchas veces se plantea con los métodos paramétricos, que exigen una distribución normal de los datos y la presencia de un determinado nivel de homogeneidad de varianza entre las variables. El no cumplimiento de estas exigencias puede acarrear problemas a la hora de analizar los datos por métodos tradicionales.

Básicamente, CART funciona en base a un algoritmo de partición recurrente que considera una serie de variables explicativas $\mathbf{X_1}$, $\mathbf{X_2}$, ... $\mathbf{X_N}$, y una variable de respuesta Y. Si la variable Y es nominal u ordinal (por ejemplo, nivel de enmalezamiento alto, medio o bajo) se aplica el método de clasificación. En caso que la variable Y sea numérica continua (por ejemplo, rendimiento) se aplica el método de la regresión.

- **Paso 1.** De todas las variables **Xi**, busca el nivel de esa variable que le permite dividir la variable **Y** en los dos grupos más homogéneos entre sí y más diferente entre ellos.
- **Paso 2.** Para cada grupo, en caso de ser completamente homogéneo, finaliza el proceso, de lo contrario vuelve al Paso 1.

La manera que posee este método para estimar el error de clasificación es utilizando 9/10 del total de los datos y con el 1/10 restante verifica si son correctamente asignados, con el propósito de generar un nivel de probabilidad. Repite este procedimiento 10 veces con diferentes porciones de la base de datos.

CART utiliza una estructura de árbol de decisión para desplegar la relación entre las variables explicativas y la o las variables de respuesta. A modo de ejemplo, en la **Figura 8.17**, se presenta el árbol generado al aplicar este procedimiento a una base de datos de 125 puntos que son localidades en diferentes chacras de arroz ubicadas en la zona Este del Uruguay, donde se midieron una serie muy amplia de posibles variables explicativas y el rendimiento de arroz en cada uno de ellos. El objetivo de este trabajo era tener una ponderación objetiva de las variables que estaban incidiendo en las diferencias de rendimientos observadas en estas 125 localidades.

En la **Figura 8.17**, podemos observar que el promedio (AVG) de rendimiento de todas las localidades fue 5999 kg/ha, con un desvío de +/- 1158 kg/ha. El algoritmo identificó a la variable RIEGO como la primer variable que permitió generar dos grupos de puntos (nodos ó nodes): el primero de ellos, con 16 observaciones y un promedio de rendimiento de 4253 kg/ha; y el segundo, conformado por 109 observaciones y un promedio de rendimiento de 6255 kg/ha. A su vez, identificó el nivel de esta variable (riego > o < 2,5) que permitió formar estos dos grupos de rendimientos. Para este caso en particular, el valor de la variable riego variaba de 1 a 5, siendo

1 el peor riego y 5 el mejor riego. Estos grupos tienen la propiedad de que los valores de rendimiento **dentro** de cada uno de ellos son lo más similares entre sí, pero a su vez, lo más diferentes **entre** estos dos grupos. Es decir, que esta técnica permitió identificar que la variable riego al nivel de 2,5 permitía conformar dos grupos de rendimientos muy diferentes. Aquellas localidades cuyo riego era mejor que 2,5 tenían un rendimiento considerablemente superior (6255 kg/ha) que las que tuvieron una peor calidad de riego (4253 kg/ha).

Continuando con el análisis de la **Figura 8.17**, podemos observar que a su vez, dentro del grupo de localidades que estuvieron "bien regadas" la variable CONTROL, por control de malezas, permitió dividir este grupo de 109 localidades en dos, uno conformado por 41 localidades que presentaron un rendimiento promedio de 5758 kg/ha y el otro, conformado por 68 localidades con un rendimiento promedio de 6554 kg/ha. El nivel de control de malezas que determinó estas dos agrupaciones de localidades fue de 3,5. En este caso en particular, la variable control de malezas variaba entre 1 y 5, siendo 1 el peor control y 5 el mejor.

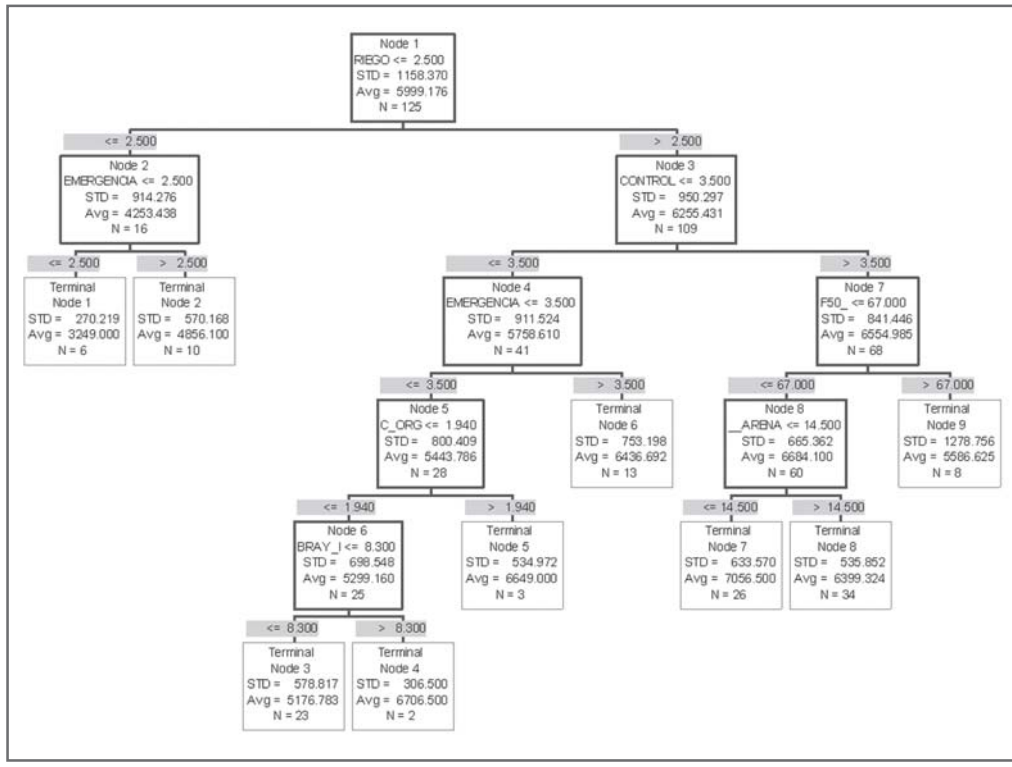


Figura 8.17: Modelo CART aplicado a 125 chacras de arroz en Uruguay.

Por lo tanto, si continuamos con el análisis del árbol generado por CART, para este caso en concreto, podemos observar que el conjunto de localidades con mayor rendimiento (n=26, 7056 kg/ha) dentro de estos 125 casos estudiados fueron aquellos que poseían la siguientes características, eran localidades con un nivel de riego superior al promedio (>2,5), poseían un nivel de control de malezas superior al promedio (>3,5), a su vez habían florecido (F50) antes de 67 días después del primero de enero y estaban ubicados en suelos con niveles de arena (ARENA) inferiores a 14,5. De la misma manera, podemos identificar que las localidades de menor rendimiento (n=6, 3249 kg/ha) fueron aquellas que presentaron, niveles de control de malezas inferiores al promedio (<3,5) y a su vez, niveles de EMERGENCIA menores a 2,5. Un aspecto importante a tener en cuenta, es que si toda esta información se encuentra georeferenciada, permite analizar si estas localidades se encuentran agrupadas en zonas específicas de lotes o chacras o si poseen ningún tipo de patrón espacial. Esta es una información importante a la hora de poder delimitar posibles zonas de manejo. Esta metodología nos permitiría, por lo tanto, determinar la variable y el valor de la misma, que deberían ser ajustados en cada una de estas potenciales zonas, en caso de que existieran.

REFERENCIAS

Breiman, L.; Friedman, J.H.; Olsen, R.A. y Stone, C.J. 1984. Classification and Regression Trees. Chapman & May, Inc., New York, NY. 358p.

Roel, A. y Plant, R. 2004a. Spatiotemporal Analysis of Rice Variability in Two California Fields. Agronomy Journal 96:77-90.

Roel, A. y Plant, R. 2004b. Factors Underlying Yield Variability in Two California Rice Fields. Agronomy Journal 96: 1481-1494.

CAPÍTULO 9

VIABILIDAD ECONÓMICA

Rodolfo Bongiovanni (1) **y Jess Lowenberg-DeBoer** (2)
(1) INTA Manfredi, Argentina
rbongiovanni@correo.inta.gov.ar
(2) Director of the Site-Specific Management Center
Purdue University, USA
lowenbej@purdue.edu

farmphoto.com

INTRODUCCIÓN

La agricultura de precisión (AP) es un ejemplo de cambio tecnológico o innovación, lo que se define como "la capacidad de transformar un producto nuevo o mejorado que pueda ser introducido al mercado; o en un proceso nuevo o mejorado que pueda ser utilizado por la producción, la industria o el comercio; o en un nuevo enfoque para poder prestar un servicio social" (OCDE, 1994). Es decir, que para que el cambio tecnológico sea tal, debe existir un proceso que involucre a los que lo adoptan, pero también al resto de la sociedad y sus instituciones. Este proceso no surge sólo de la investigación, sino principalmente de la interacción entre ciencia, mercado y sociedad (Reca y Parellada, 2001).

Desde el punto de vista del mercado, el cambio tecnológico representa un desplazamiento hacia la derecha de la curva de oferta (Longo y Gavidia, 2002), o la condición en la que los productores ofrecen mayor cantidad de producto al mismo precio.

Obschatko (2003) también explica el cambio tecnológico como un desplazamiento de la función de producción, manteniendo una relación estable entre el producto y los factores. Es el residuo que no es explicado por los cambios en el uso de insumos, pero también es un proceso socioeconómico por el cual, se introducen modificaciones en las formas de producir con el objetivo de aumentar la productividad.

Para explicar la adopción de las nuevas tecnologías de la agricultura de precisión (AP), Vanacht (2001) sugiere la aplicación del "ciclo hype", un concepto tomado de Marketing. Según este autor, la adopción de la AP en el mundo comenzó aproximadamente en 1995 con un crecimiento vigoroso y sostenido con miles de ha cosechadas con monitor de rendimiento que se sumaban cada año, con la aparición de nuevas tecnologías (GPS, GIS, monitores, etc.) y con la inversión de grandes empresas en investigación y desarrollo (I&D) de AP, tanto en Norteamérica como en Europa, Australia y Sudamérica.

Este autor, identificó una meseta en la adopción alrededor del año 2000, producida por una menor tasa de crecimiento, o inclusive una contracción, especialmente en las zonas líderes del mundo, que alcanzaron un punto de inflexión. Asimismo, en esta fecha se redujo la oferta de servicios de aplicación y/o consultoría, con menos cantidad disponible de asesores especializados, a la vez, que las grandes empresas dejaron de invertir en I&D. Esto, se tradujo en una desaparición del tema de las primeras planas de la prensa agropecuaria.

¿Por qué se produjo ésto? Vanacht sugiere, que la confluencia de nuevas tecnologías creó un "efecto gatillo" o disparador en el mercado, aunque las expectativas todavía no estaban en sintonía con la realidad de los beneficios que estas tecnologías eran capaces de brindar. Este "efecto gatillo" llevó a una etapa de "consumo irracional" (aproximadamente entre 1996 y 2000), que fue seguida por otra etapa de "frustración" (entre 2000 y 2004).

Años más tarde, el mercado naturalmente alcanza un equilibrio, que se traduce en una etapa de "madurez y rentabilidad", que el autor pronosticó a partir del 2005. Esto se llama "Ciclo Hype" y coincide con otros modelos de pronóstico de adopción de la AP, como el publicado por Lowenberg-DeBoer (1997) y con las tasas de adopción actual.

En su modelo de pronóstico de adopción de la AP, Lowenberg-DeBoer (1997) explica que el cambio tecnológico es confuso y desorganizado, a la vez, que exige cambiar la forma de pensar y de trabajar. La tecnología no aparece repentinamente del laboratorio o de un seminario, totalmente formada y perfectamente operacional, sino que requiere un período de adaptación, con productores innovadores, fabricantes y científicos, cada uno haciendo lo que le corresponde para que la tecnología sea tanto práctica como rentable.

En este contexto, los productores y los agronegocios deben tomar decisiones tecnológicas. No pueden esperar a que las aguas se calmen y que la tecnología madure, porque sería muy tarde. La historia indica que la mayor parte de los beneficios económicos de cualquier cambio tecnológico es aprovechada por los primeros en adoptar la nueva tecnología.

Sintetizando, y desde un punto de vista de la empresa agropecuaria, la AP cubre tres áreas principales: (1) producción; (2) administración; y (3) medio ambiente.

Desde el punto de vista (1) microeconómico o de la producción, las técnicas de la AP pueden ser aplicadas, por ejemplo, para la búsqueda de: (a) la eficiencia técnica y económica (rentabilidad); (b) el control de la calidad; (c) la trazabilidad de la producción; (d) el control de plagas y enfermedades; (e) la fertilización con dosis variable (DV); etc.

La AP también puede ser adoptada como (2) una herramienta de gestión, para: (a) registrar datos; (b) supervisar empleados; (c) controlar actividades; (d) controlar a los contratistas; y (e) capacitar a los operarios.

Por último, pero no por ello menos importante, la AP (3) es una herramienta útil para proteger el medio ambiente y contribuir a la sustentabilidad de la agricultura (Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer, 2004).

El propósito de este capítulo es identificar modelos que ayuden a los productores y a las personas de negocios a tomar decisiones estratégicas acerca de uno de los mayores cambios tecnológicos de la agricultura de los últimos años: la Agricultura de Precisión.

ESTIMACIÓN DE LOS BENEFICIOS DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN LA PRODUCCIÓN

El potencial de la AP es el de reducir los costos en la producción de granos, aumentar la productividad y hacer un uso más eficiente de los insumos. En un sentido más amplio, la AP permite administrar los insumos en el tiempo y en el espacio, optimizar la logística de las operaciones a campo, supervisar el trabajo de los empleados en el campo, manejar los riesgos de la producción, vender productos diferenciados, proveer trazabilidad de los productos para consumo humano y documentar los insumos aplicados para cumplir con reglas de protección ambiental. Desde el punto de vista de la gestión, los monitores de rendimiento también son una herramienta para diagnosticar malezas, pestes, enfermedades, problemas de drenaje y fertilidad, diferencias en sistemas de labranza, y por lo tanto, se los usa para la toma de decisiones en la elección de híbridos, variedades o agroquímicos.

Hasta aquí hemos estudiado qué es la AP, cuáles son sus principales herramientas y sus perspectivas de adopción. Ahora nos dedicaremos a estimar los beneficios de la AP, usando la metodología de los presupuestos parciales. Calcular los costos de la información sobre un período de varios años, identificar los costos que tienden a ignorarse con el cálculo de los márgenes y por último, identificar las dificultades en determinar las diferencias de rendimiento cuando se usan las técnicas de la AP. Este capítulo sigue la metodología empleada por Lowenberg-DeBoer (2000).

La información es un insumo más de la producción, como lo puede ser la semilla, el fertilizante, los pesticidas y el combustible, por lo que permite usar la metodología de los presupuestos parciales. Un aspecto clave es que la información sólo tiene valor en la medida en que produzca un cambio en la toma de decisiones. La información que no se usa no es diferente a la semilla que sobra o el fertilizante que no se aplica. Pero a diferencia de muchos insumos, la economía de la AP es sitio-específica. La rentabilidad de las tecnologías de AP difiere entre establecimientos

debido a diferencias en suelos, manejo y microclima. Estas diferencias sitio-específicas hacen necesario que los productores estudien la rentabilidad de la AP en sus propios lotes.

El cambio en el margen que resulta de la adopción de una herramienta de la AP puede ser estimado por hectárea (ha) o para todo un lote, usando la metodología de presupuestos parciales. La información que se pueda amortizar en varios años se debe tratar como un bien durable, como por ejemplo, el mapa de elevación digital de un lote.

El presupuesto parcial se fija en los cambios de los ingresos y los costos cuando se aplican nuevas prácticas de producción. Deduce las modificaciones en los costos de la de los ingresos, de modo tal de estimar el cambio en el margen que resulta de adoptar una nueva práctica de producción:

Cambio en el margen = cambio en los ingresos – cambio en los costos

Un análisis de rentabilidad más completo debería incluir el impacto sobre el establecimiento o la empresa como un todo y los cambios en el riesgo de rendimientos y de costos de producción, pero, por lo menos, el método de presupuestos parciales es una buena forma de comenzar a estudiar los beneficios económicos de la AP.

1. Estimación de los cambios en costos

En la mayoría de los casos, es más fácil estimar el cambio en los costos, que estimar el cambio en los ingresos. El de costos es mucho más fácil de determinar en el caso de contratar los servicios de AP a un contratista, siempre y cuando, exista en la zona. En este caso, el cambio en el costo es simplemente la tarifa que cobra el contratista.

Cuando la toma de información, el análisis y la implementación se hacen con mano de obra y equipamiento propios, el cálculo de costos se complica un poco.

Lo más difícil es estimar el cambio en los ingresos, debido principalmente, a la variabilidad climática. En la mayoría de los casos estudiados en otros países, los costos de la AP no dependen del clima, mientras que la respuesta de rendimiento a alguna práctica de AP en un año dado puede variar ampliamente, debido a las precipitaciones u otros factores climáticos.

En el cálculo de costos aparecen algunos problemas típicos, por ejemplo, cuando se usa la información durante varios años y cuando se omiten algunos costos. Algunos ejemplos de información que se puede usar durante varios años son el análisis dirigido de suelos, los mapas de elevación digital, las fotografías aéreas de suelo desnudo, etc. Los análisis de suelo se suelen hacer en ciclos de tres a cinco años, dependiendo de la rotación de cultivos. La topografía y el color del suelo en las fotografías aéreas pueden cambiar en el tiempo, pero muy lentamente. Este tipo de información se puede usar por diez años o más.

Cuando la información se usa por varios años se puede tratar como un bien durable. El costo anual de usar cualquier bien durable tiene dos componentes:

1) El costo de oportunidad del dinero invertido; y

2) La depreciación.

El costo de oportunidad de los fondos invertidos en información de AP es la rentabilidad que tendrían esos fondos en la mejor alternativa de inversión. Por ejemplo, si en lugar de invertir en AP, un productor hubiera pagado una deuda, el costo de oportunidad del dinero invertido sería la tasa de interés de esa deuda. El costo de oportunidad también podría determinarse en base a la

rentabilidad potencial de otras tecnologías innovadoras, en la ampliación de la superficie trabajada, o en nuevas prácticas de producción. Dentro de los ejemplos de inversiones alternativas, se podría mencionar la rentabilidad de un nuevo sistema de almacenaje de granos a campo, la rentabilidad de alquilar más tierras, o de producir un nuevo cultivo, o de invertir fuera de la actividad agrícola. Para facilitar los cálculos, esa rentabilidad potencial debe expresarse como una tasa anual, similar a una tasa de interés. En ese caso, el costo de oportunidad del dinero invertido es el total invertido multiplicado por la tasa de interés.

La depreciación es una estimación del uso anual de un bien y no es lo mismo que la amortización contable. La forma más fácil de estimar la depreciación es asumir que todos los años se usa la misma proporción de un bien. Este es el método de depreciación lineal:

Depreciación lineal = inversión / vida útil

Por ejemplo, si un productor invirtiera 8 USD/ha en muestreo y análisis de suelos y se hiciera cada cuatro años, la depreciación por el método lineal sería de 2 USD/ha. Cabe aclarar que existen otros métodos alternativos para estimar tanto el costo de oportunidad del capital como la depreciación.

El **Cuadro 9.1** muestra cómo se pueden estimar los costos anuales para el caso de muestreo dirigido de suelos en un campo que ya cuenta con un GPS y con un vehículo para ir a muestrear. El presupuesto parcial sólo considera el costo extra de trabajo de muestreo y de análisis en laboratorio. Este ejemplo, asume un muestreo dirigido intensivo cada tres ha, aproximadamente, tres minutos para obtener y empaquetar la muestra y un 10% de costo de oportunidad del capital.

Cuadro 9.1: Anualización de los costos de información, para el caso de un muestreo dirigido de suelos en un lote de 40 ha y para un ciclo de muestreo de 4 años (USD).

Ítem	Unidad	Cantidad	Precio	USD/ha
Mano de obra para el muestreo	Hora	3,25	$ 10,0	32,50
Costo de los análisis de suelo	Análisis	13,00	$ 7,50	97,50
Total costo variable				130,00
Costo de oportunidad del capital (10% interés)				13,00
Depreciación lineal sobre 4 años				32,50
Costo anual para un lote de 40 ha				45,50
Costo anualizado por ha				1,38

Adaptado de Precision Farming Profitability, Lowenberg-DeBoer (ed.), 2000

Los 130 USD para el lote de 40 ha representan un monto importante a los efectos del flujo de dinero, pero si se tomara para un solo año, castigaría el costo de tener información sobre la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Si todos los costos se aplicaran a un solo año, no habría ningún sistema de manejo intensivo que fuera rentable. Los 45,50 USD para el lote de 40 ha, o los 1,38 USD/ha, es una estimación del costo económico anual de esa información. La anualización de los costos se obtiene con la fórmula:

$$(I * d) / (1 - (1 + d)^{-n})$$

donde:

I es el costo de la información;

d la tasa de descuento; y

n la vida útil de la información.

Se debe hacer énfasis en la palabra "estimación", porque no existe ningún método perfecto para calcular los costos anuales. La mejor prueba de que un método de estimación de costos funciona es que resulte en decisiones rentables.

Costos que tienden a ser ignorados

Los análisis económicos de la AP que han sido publicados tienen una tendencia a estudiar los cambios en la cantidad de insumos aplicados y en el cambio de los costos (ver Griffin et al, 2004, para una completa revisión), pero hay otros costos que también deben ser considerados:

- Recolección de datos. Por ejemplo, el muestreo dirigido de suelos, las imágenes satelitales, el seguimiento del cultivo, etc.;
- Análisis de datos. Por lo general se requiere de un software especializado para analizar los datos y generar recomendaciones de manejo sitio-específico; y
- Capacitación. Ni los productores ni los consultores-asesores nacen con la capacidad para analizar los datos de la AP. Esta es una habilidad que se debe adquirir. El tiempo de aprendizaje compite con el tiempo destinado a otras actividades productivas y puede exigir tomar cursos de capacitación, participar en talleres, asistir a conferencias, etc.

El costo que más tiende a ser ignorado es el de capacitación en AP. Este costo es muy fácil de estimar en el caso que esa capacitación se compre como el servicio de un asesor profesional. Pero si es el productor quien se capacita, hay que tener en cuenta todos los gastos relacionados al aprendizaje formal. Estos gastos son relativamente fáciles de identificar y comprenden el costo de asistencia a cursos de capacitación, incluyendo el costo del viaje, libros u otros materiales de apoyo que se compren. El costo de aprendizaje por experiencia en el trabajo es más difícil de cuantificar. Por ejemplo, ¿cuál es el costo de un día de cosecha dedicado a aprender cómo manejar y calibrar un monitor de rendimiento? Aunque el costo de aprendizaje por experiencia en el trabajo no sea fácil de cuantificar, hay que reconocer que puede ser elevado.

Dado el rápido cambio tecnológico actual, la capacitación en AP se deprecia a ritmo acelerado. Sin embargo, su costo se puede distribuir en varios años de uso.

Los cambios en los costos pueden ser tanto positivos como negativos. En algunos casos, los costos del uso de insumos pueden caer lo suficiente como para compensar el costo extra de la información, el análisis y la implementación.

2. Estimación de los cambios en los ingresos

Al considerar los cambios en los ingresos por lo general, se piensa en términos de aumento de rendimiento, aunque en realidad hay una serie de impactos positivos sobre los ingresos que hay que tener en cuenta, incluyendo:

- *Mejoras en la calidad*. Por ejemplo, los nuevos sensores que analizan el contenido de proteína de los granos (Lowenberg-DeBoer, 2005) pueden contribuir a que los productores de trigo realicen una cosecha diferencial por zonas de diferente contenido proteico y que vendan el producto diferenciado con mayor precio;

- *Producción bajo contratos y apertura de mercados nicho*. Dado que la AP brinda al productor un mayor control sobre la producción agrícola, le permite acercarse más a la "producción por especificación" que requieren ciertos contratos con la industria y algunos mercados de productos especiales. Los productores que usen AP llevan la ventaja al momento de negociar contratos;

- *Cumplimiento de leyes ambientales*. En el futuro será necesario cumplir con leyes y reglamentos de prevención de la contaminación ambiental, tal como ocurre actualmente en países desarrollados, ya sea por temor a una multa, o porque es un requisito necesario para cumplir con normas de calidad. La AP permite llevar un registro detallado sobre qué insumo se aplicó, cuánto y dónde, lo que en cierta forma brinda al productor una "licencia para producir". Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer (2004) demostraron que la AP puede ser una alternativa rentable cuando existen restricciones en la fertilización con nitrógeno; y

- *Mejoras en logística de la producción y la comercialización*. La información que brinda el monitor de rendimiento a medida que se avanza en la cosecha permite, por ejemplo, separar el grano más húmedo del grano relativamente más seco. En algunos casos, esto permitiría sacar ventaja al llegar antes al mercado con un grano seco, obteniendo mejores precios que si hubiera que esperar un tiempo de secado, etc., sin dejar de cumplir con contratos o compromisos firmados con anterioridad.

3. Dificultades para estimar los beneficios de la agricultura de precisión

Algunos de los problemas claves que se pueden presentar al momento de estimar los beneficios de la AP pueden ser:

- *Falta de evidencia de mayor ingreso*. El incremento de rendimiento físico y la mejora en la calidad del producto son las dos principales fuentes primarias de ingreso que se pueden esperar de la AP, pero no son fáciles de cuantificar. El **Cuadro 9.2** muestra un ejemplo de presupuesto parcial de un campo de 526 ha que usó AP. La principal fuente de rentabilidad proviene del mayor ingreso que generó el aumento de rendimiento del maíz, el que se incrementó significativamente al pasar de un manejo tradicional a un manejo sitio-específico;

- *Puede que la diferencia no sea visible a simple vista*. La AP se trata de "poner a punto" los sistemas de producción. Los monitores de rendimiento y otros sensores pueden medir diferencias de rendimiento y de calidad que no son percibidos a simple vista. El análisis con un sistema de información geográfica (GIS) permite identificar tendencias y problemas en el cultivo que de otro modo no se hubieran detectado;

- *Los beneficios son específicos para cada campo y no generalizables*. La "puesta a punto" que se hace a través de la AP incluye el manejo óptimo de suelos, microclimas, habilidades gerenciales, y oportunidades comerciales. La sinergia entre todos los componentes de un sistema de

producción puede brindar una ventaja competitiva. Para lograr esta sinergia se requiere tener conocimiento del terreno, que sólo se puede adquirir a través de un seguimiento continuo del establecimiento productivo y de la realización de algunos ensayos a campo. Las ventajas o beneficios sólo pueden ser medidos en el lugar donde ocurren;

- *Hay algunos beneficios de la AP que sólo se pueden medir a nivel del establecimiento.* Por ejemplo, si un productor usa los mapas de rendimiento y los análisis de suelo para diagnosticar un problema de plagas, malezas o enfermedades, las decisiones que se tomen van a ser sobre el planteo de rotaciones y sobre otros factores de manejo a nivel de la explotación como un todo, no solamente sobre el lote donde se detectó el problema. En este sentido, los ensayos a campo no ayudan a medir estos beneficios; y

- *Algunos de los beneficios de la AP se perciben fuera del campo.* A las herramientas de la AP se les puede sacar un provecho igual o mayor al que se obtiene con el manejo de la variabilidad dentro de un lote, como ser los beneficios que se pueden obtener de los sensores remotos para una mejor comercialización del registro de insumos aplicados para proveer certificación de inocuidad y calidad de alimentos o de los mapas de rendimiento para negociar el arrendamiento de la tierra.

4. Ejemplo de presupuesto parcial

El **Cuadro 9.2** brinda un ejemplo de presupuesto parcial, en base a los ensayos a campo de AP en un campo de 526 ha que produce maíz y soja. El testigo con el cual se comparan los resultados, es el manejo convencional con aplicación uniforme de fertilizantes y con dosis de siembra constante. En este campo, el principal beneficio del manejo sitio-específico fue el mayor ingreso que generó el aumento de rendimiento del maíz en los suelos más pobres, con menor potencial de rendimiento. El incremento de rendimiento promedio de maíz producido con AP fue de casi 1000 kg por ha. Estos cambios se estimaron en tres años de mapeo de rendimiento de ensayos a campo, en franjas que ocuparon un total de 80 ha por año. Los rendimientos de cada franja se estimaron según tipos de suelo.

Para estimar el costo en equipamiento se usó un costo de oportunidad del capital del 10% y el método de depreciación lineal sobre una vida útil de 3 años. Además del costo anual del capital y de la depreciación, se incluyó un 0,9% de impuestos y seguros, como así también un coeficiente de reparación y mantenimiento del 2% sobre el valor a nuevo. La corta vida útil es un supuesto conservador, debido al rápido cambio tecnológico. Tanto la computadora portátil, como la sembradora de grano grueso y el controlador para dosis variable de nitrógeno se usaron solamente para maíz, por lo que su costo se distribuyó sobre un 50% de la superficie del campo.

La vida útil del equipamiento para manejo sitio-específico es similar a la de las computadoras y otros equipos electrónicos. En este caso, el costo anual del monitoreo de rendimiento con GPS es de unos USD 8,78 por ha (USD 3,51 /ha + USD 5,27 /ha).

Los resultados obtenidos muestran, que los costos totales con respecto a la cantidad de fertilizantes utilizados cayeron levemente (USD 9,54 /ha), pero no lo suficiente como para compensar el aumento en el costo de muestreo con análisis de suelos (USD 12,35 /ha) y en el costo extra de la aplicación con dosis variable (USD 12,35 /ha). La aplicación de nitrógeno, fósforo y potasio fue menor, mientras que la aplicación de micronutrientes fue un poco mayor.

En este ejemplo, el costo total en semillas no cambió mucho, porque el aumento de la densidad de siembra en los suelos ricos, de alto potencial de rendimiento, compensó la disminución de la densidad de siembra en los suelos pobres, de bajo potencial de rendimiento. Con la densidad de siembra uniforme (convencional), la población fue de 82.000 semillas por ha, mientras que con la densidad de siembra variable, la población osciló entre 79.000 y 89.000 semillas por ha.

Los honorarios del especialista en AP se distribuyeron sobre toda la superficie del campo, reflejando el mayor costo que significa el mejor conocimiento de las variables de producción debido a la AP. Este costo es real y debe ser tenido en cuenta, ya sea que el productor contrate a un asesor, o que el productor se capacite y realice el análisis por sí mismo.

En conclusión, los retornos netos al manejo sitio-especifico se estimaron en 46,59 USD/ha. Esto no incluye los beneficios extras que se pueden obtener en el mercado de arrendamiento de la tierra.

Cuadro 9.2: Ejemplo del presupuesto parcial de un campo de 526 hectáreas que produce maíz y soja con agricultura de precisión (USD).

Ítem	Unidad	Cantidad	Precio unitario (USD)	Monto/ha (USD/ha)
Cambio de rendimiento	Kg/ha	960,72	0,09	**86,99**
Cambio de costos de equipamiento				
Monitor de rendimiento	Ítem	1	4000	3,51
GPS	Ítem	1	6000	5,27
Controladores para la siembra y fertilización	Ítem	1	5000	8,78
Computadora portátil	Ítem	1	3000	5,27
Aumento total en el costo de equipamiento				**22,83**
Cambios en los costos de fertilizantes				
Nitrógeno	Kg/ha	-0,49	0,55	-0,27
Fósforo	Kg/ha	-16,42	0,66	-10,85
Potasio	Kg/ha	-3,73	0,29	-1,07
Azufre	Kg/ha	2,43	0,46	1,12
Zinc	Kg/ha	0,12	5,20	0,64
Boro	Kg/ha	0,06	15,79	0,88
Aumento total en el costo de equipamiento				**-9,54**
Cambio en el costo de semilla	Bolsas/ha	0,01	90,00	1,18
Cambio en el costo de muestreo de suelos	Ha	1	12,35	12,35
Cambio en el costo de aplicación de fertilizante	Ha	1	12,35	12,35
Honorarios del especialista en AP	Campo	1	650,00	1,23
Retornos netos al manejo sitio-específico				**46,59**

Adaptado de Precision Farming Profitability, Lowenberg-DeBoer (ed.), 2000

5. Ejemplo del análisis económico de un ensayo de dosis variable de N en maíz por el método del balance

La determinación de la "dosis agronómica" de N por el método del balance es el tradicionalmente usado para determinar la dosis de N necesaria para alcanzar un rendimiento objetivo. Se calcula teniendo en cuenta cuál es la cantidad de N necesaria por unidad de rendimiento, a la que se le debe deducir la cantidad de $N\text{-}NO_3$ disponible en el suelo y la cantidad de N disponible por mineralización de la materia orgánica. A este valor obtenido se lo divide por la eficiencia de uso del N por parte de la planta, para obtener la dosis de N a aplicar como fertilizante:

$$\text{N Fert} = (\text{NTotal requerido} - \text{N-NO}_3 - \text{NMineralización}) \,/\, \text{Eficiencia}$$

Para adecuar este método a los propósitos de la agricultura de precisión, el primer paso es determinar zonas de manejo dentro del lote.

Estas zonas se pueden determinar en base a las cartas de suelo, fotografías aéreas o imágenes satelitales, topografía, o bien en base a la experiencia que tenga el productor con respecto a la variabilidad presente dentro de un lote. Con esta información se pueden determinar, por ejemplo, zonas de baja, media y alta fertilidad, o zonas en base al mapa de elevación digital, etc. (Ver Capítulo 4).

El segundo paso es el muestreo dirigido de suelos dentro de cada zona de manejo. Estas muestras se analizan en un laboratorio de análisis de suelos y los resultados de $N\text{-}NO_3$ y de porcentaje de materia orgánica (MO) se interpretan para determinar la cantidad de N a aplicar. Por ejemplo, un análisis de suelo que indique el contenido de $N\text{-}NO_3$ en partes por millón (ppm) y el porcentaje de MO se puede usar para calcular la dosis de N por cada zona de la manera que ilustra el ejemplo en el **Cuadro 9.3**.

Cuadro 9.3: Cálculo de la cantidad de N disponible en la zona de alto potencial de rendimiento

1) Prof (cm)	0 -20	20 - 40	40 - 70	70 - 100	TOTAL
2) Prof (m)	0.2	0.2	0.3	0.3	
3) Prof (cm)	1.25	1.24	1.24	1.24	
4) DAP	2.5	2.48	3.72	3.72	
5) $N\text{-}NO_3$ (ppm)	11.6	9.66	6.73	5.12	
6) $N\text{-}NO_3$ (kg/ha)	29.00	23.96	25.04	19.05	97.04
7) EUN					0.65
8) Kg $N\text{-}NO_3$					63.08
9) % M.O.					2.34%
10) N de M.O.					5.80%
11) % de miner.					3.00%
12) N mineralizado					101.79
13) EUN					0.75
14) kg/ha N de M.O.					76.34
15) kg N total					139.42

El muestreo de suelos debe hacerse por lo menos hasta los 40 cm de profundidad, divididos en segmentos. En este ejemplo se hizo hasta el metro de profundidad [1 y 2]. El dato de la densidad aparente [3) DAP] puede provenir del mismo laboratorio de suelos o de una carta de suelos publicada. El peso del suelo [4] (en miles de toneladas) surge de multiplicar la densidad aparente [3] por la profundidad del suelo [2], por 10, que es un factor de corrección de unidades.

La cantidad en kg/ha de **N-NO_3** en el suelo [6] se obtiene multiplicando el peso del suelo por las ppm de N. La cantidad total en el metro de profundidad se obtiene sumando las cantidades calculadas en cada segmento de profundidad. Para obtener la cantidad de N-NO3 disponible para la planta [8], se multiplica la cantidad de N-NO_3 en el suelo [6] por la eficiencia de uso del N por la planta [7) EUN].

La cantidad de N proveniente de la **mineralización de la MO** se obtiene a partir del resultado de laboratorio [9) % M.O.]. Los datos de N en M.O. [10] y el % de mineralización de la MO [11] pueden provenir del mismo laboratorio o de la bibliografía. Finalmente, la cantidad de N proveniente de la mineralización de la MO se calcula multiplicando el peso del suelo [4] en los primeros 20 cm, por [9], por [10], por [11], y por un factor de corrección de unidades de [1.000.000]. Para obtener la cantidad de N mineralizado disponible para la planta [14] se multiplica la cantidad de N mineralizado en el suelo [12], por la eficiencia de uso del N por parte de la planta [13) EUN].

Una metodología alternativa (más precisa) para la determinación del N proveniente de la mineralización de la MO es a través del método Kjeldahl, provisto por los laboratorios de análisis de suelo.

La cantidad de N total disponible para la planta [15] se obtiene sumando la cantidad de N-NO_3 disponible [8], y la cantidad de N mineralizado disponible para la planta [14].

Por último, si el rendimiento objetivo esperado en la zona de manejo es de 18 t/ha, y si por la bibliografía o la recomendación de los expertos se conoce que se necesitan 20 kg de N por cada t de rendimiento de maíz, entonces la cantidad de N requerida por el cultivo será de: 18 t/ha * 20 kg/t = **360 kg/ha**. Dado que en el ejemplo la cantidad de N disponible en el suelo es de **139,42 kg/ha**, entonces la dosis de fertilizante N a aplicar será: (360 kg/ha - 139,42 kg/ha) / 0,80 = **275,73** kg/ha, en la zona denominada "de alto potencial de rendimiento" (**Cuadro 9.4**).

Cabe aclarar, que para poder comparar la diferencia en los ingresos, siempre es recomendable dejar un testigo que indique cuál es el resultado que se hubiera obtenido en caso de haber realizado un manejo tradicional. En este caso, se tomó un promedio ponderado de todos los análisis de suelo y se aplicó una dosis uniforme a todo el lote.

Cuadro 9.4: Cálculo de la necesidad de fertilizante N en c/u de las zonas de manejo

Zonas de potencial de rendimiento	Rendimiento esperado (t)	Kg de N por t de grano (kg)	Necesidad de N (kg)	N disponible	EUN (fertilizante)	Necesidad de fert. (Kg/ha)
Alto	18	20	360	139.42	80 %	275.73
Medio	14	20	280	135.55	80 %	180.56
Bajo	11	20	220	86.13	80 %	167.34
Ponderado	14	20	274	118.16	80 %	198.24

Los cálculos realizados en este ejemplo deben repetirse para cada una de las zonas de manejo que se hayan determinado dentro del lote. Cuanto mayor sea la variabilidad presente dentro de un lote, mayores serán los **beneficios** por el tratamiento diferencial de las diferentes zonas, los que se pueden estimar a través de "presupuestos parciales".

El **Cuadro 9.5** muestra los beneficios a nivel del lote, obtenidos por el manejo diferencial de tres zonas de diferente potencial de rendimiento de maíz. Para lograr estos resultados, se comparó el beneficio obtenido por manejo diferencial de las tres zonas con el beneficio que se hubiera obtenido por hacer dosis uniforme. Esto se pudo hacer gracias a que se dejó una franja con dosis uniforme en cada zona de manejo, la que se determinó en base a un promedio de los análisis de suelo. Los resultados indican un beneficio de USD 606 por el manejo diferencial. A este beneficio hay que deducirle el costo extra del muestreo (USD 10 c/u) y análisis de suelo (USD 14 c/u). Para el manejo diferencial se tomaron y analizaron un total de 3 muestras a un costo de USD 24 * 3 = USD 72. Para el manejo uniforme el costo hubiera sido el de una sola muestra y análisis (USD 24), por lo que en realidad, el costo extra fue de (USD 72 - USD 24 = USD 48). En conclusión, los **beneficios por manejo diferencial de la dosis de N** fue de USD 606 - USD 48= USD 558 **en 45 ha**, o lo que es lo mismo: **12,4 USD/ha** (**Cuadro 9.5**).

Al igual que en el ejemplo anterior, el principal beneficio del manejo sitio-específico fue el mayor ingreso que generó el aumento de rendimiento del maíz en los suelos más pobres, con menor potencial de rendimiento. El ejemplo es muy similar al anterior, aunque el tratamiento de los costos es menos complejo en este caso.

Cuadro 9.5: Resultados económicos de la dosis diferencial (USD)

Zonas de potencial de rendimiento	Alto	Medio	Bajo	TOTAL Ponderado
Costo de fertilizante	**$ 835**	- $ 184	- $ 545	**$ 106**
Costo de semillas	**$ 216**	**$ 59**	- $ 187	**$ 89**
Valor de producción	$ 339	**- $ 635**	$ 1,097	$ 801
Retorno a la DV de fertilizante y semillas	**- $ 713**	**- $ 510**	$ 1,829	$ 606
Costo extra de muestreo y análisis				**$ 48**
Resultado en 45 ha				$ 558
Resultado por ha				$ 12.4

6. Ejemplo del análisis económico de un ensayo de dosis variable de N en trigo por el método de la curva de respuesta

La agricultura de precisión también se puede explicar desde el punto de vista de la economía de la producción, una rama de la economía agraria que se ocupa de los procesos de decisión entre producciones alternativas, es decir, qué producir, cuánto producir y cuál es la combinación óptima de recursos, a la vez que considera la influencia que ejercen los cambios tecnológicos y económicos sobre estas decisiones. La principal herramienta de la economía de la producción es la curva de respuesta.

La curva de respuesta o función de producción es una descripción cuantitativa o matemática de las diferentes posibilidades de producción. Representa la relación técnica entre un factor de producción variable y un producto, y brinda el o los productos esperados, en términos físicos, para cada nivel de insumo(s), también en términos físicos. Una función de producción se puede expresar como:

$$y = f(x_i)$$

donde: y es la cantidad producida; y

xi son los factores variables de producción.

Si bien es cierto, que es imposible hacer una lista completa de todos los factores que intervienen en la producción de un cultivo en particular, la función de producción es una simplificación que nos permite estimar la cantidad de la producción alcanzada con relación a cantidades variables de insumos. Asume que: (1) hay una relación causal entre insumos (x_i) y productos (y); (2) hay rendimientos decrecientes para cada insumo (x_i), de modo tal que el aumento de producto que se logra por agregar más insumo se hace menos y menos, y que pasado el punto de máximo rendimiento, cantidades adicionales de x_i pueden tener un efecto negativo sobre el rendimiento; por último, asume (3) retornos a escala decrecientes, por lo que un incremento proporcional de todos los insumos resultará en un incremento menos que proporcional en el producto.

La función de producción permite controlar el nivel de insumos para alcanzar un objetivo deseado, que, por lo general, es el de maximizar la rentabilidad (π), es decir, maximizar la diferencia entre el valor del producto y el costo de los insumos:

$$\pi = \mathbf{p_y\, y - \varepsilon\, p_i\, x_i - F}$$

donde: p_y es el precio del producto y;

p_i los precios de los insumos; y

F son los costos fijos

Para maximizar la rentabilidad con respecto a un insumo en particular (x_1), se toma la primer derivada de π, y se despeja x_1: $\mathbf{\partial\pi/\partial x_1 = p_y\,(\partial y/\partial x_1) - p_1}$

La condición para máxima rentabilidad es: $\mathbf{\partial y/\partial x_1 = p_y/p_1}$. Es decir, la máxima rentabilidad se da cuando el valor marginal del insumo es igual a la relación inversa de precios (p_y/p_1), o bien, cuando el valor marginal del producto es igual al costo del insumo marginal: $\mathbf{p_y\, \partial y = p_1\, \partial x_1}$.

A pesar de que puede parecer complicado, la interpretación es muy simple. Esta igualdad implica que el costo de la última unidad de insumo debe ser igual al valor del producto extra obtenido por el uso de esa unidad de insumo, o que para máxima rentabilidad, la última unidad de insumo se debe pagar por sí misma. Esta igualdad significa que el uso de una menor cantidad de insumo

estaría sobrepagando ese insumo, y que una mayor cantidad de insumos no alcanzaría a cubrir su costo. Por ejemplo, en el caso de la respuesta del cultivo a la fertilización nitrogenada, la rentabilidad es máxima cuando la respuesta marginal a un kg de N se iguala a los kg de grano que deben venderse para pagar por ese kg de N. Si la cantidad de N es mayor a esa igualdad, los kg de N que se agreguen no producirán un aumento de rendimiento suficiente como para pagar su costo. Si el N se reduce por debajo de esa igualdad, se pierden ganancias. En el punto de máximo rendimiento físico, el producto marginal del insumo es cero, por lo que no puede pagar el costo de insumos.

Por lo general, son pocas las formas matemáticas que se usan para las funciones de producción, dependiendo de (a) las características técnicas de la respuesta (biológicas, químicas, nutricionales, etc.); (b) la información disponible; y finalmente (c) el uso que se intente dar a la información producida. La forma funcional cuadrática es la más usada para estudiar los procesos de producción agrícola (especialmente la respuesta del cultivo a los nutrientes), porque es la que presenta la mayor significancia estadística, se ajusta mejor a la teoría biológica y económica del proceso de respuesta, y es una de las más fáciles de computar. Para la fertilización nitrogenada, la rentabilidad con una respuesta cuadrática es: $\pi = p_y (\alpha+\beta N+\gamma N^2) - p_N N - F$. La primer derivada es: $\partial_x / \partial_N = p_y (\beta+2\gamma N) - p_N = 0$, y despejando, la cantidad óptima de N es: $N^* = [(p_N / p_y) - \beta] / 2\gamma$.

Para mayores detalles, ver el Capítulo 8.2, ó consultar el protocolo detallado en Bongiovanni (2002b), disponible en Internet.

Riesgo

El riesgo también es un factor que debe tenerse en cuenta en el estudio de la respuesta del cultivo en el tiempo. La influencia del riesgo complica el análisis de respuesta, porque es difícil de analizar. La dificultad no radica tanto en la forma matemática, sino porque el riesgo involucra valoraciones subjetivas sobre: (a) las probabilidades de ocurrencia de diferentes alternativas; y (b) las preferencias sobre los resultados de haber elegido dichas alternativas. Dado que estos elementos son subjetivos, las condiciones de maximización de la rentabilidad que son convenientes para una persona, pueden ser totalmente inconvenientes para otra.

En el análisis de rentabilidad de la respuesta del cultivo al N, el riesgo en la rentabilidad ocurre porque los rendimientos, los precios, o ambos a la vez son inciertos. La incertidumbre sobre el rendimiento ocurre porque algunas variables (por ej.: el clima) no están bajo el control del productor y porque sus niveles no se conocen al momento en que se toma la decisión sobre el insumo que está bajo control del productor (por ej.: la dosis de N). A pesar de que no se conoce el rendimiento que se va a lograr, se le puede asignar una distribución de probabilidad, con relación a la combinación de determinados niveles de las variables inciertas. Esta probabilidad de distribución del rendimiento es relevante en un análisis de rentabilidad siempre y cuando haya alguna interacción en la respuesta entre cualquiera de las variables controladas y las inciertas. Por otro lado, la incertidumbre sobre el precio del producto también ejerce influencia al momento de tomar la decisión, ya que este precio es incierto al momento en que se toma la decisión sobre las variables controladas (por ej.: la dosis de fertilizante).

La ecuación para la distribución de probabilidad de rentabilidad $h(\pi)$, donde la distribución conjunta del precio del producto, py, y el rendimiento, Y, son condicionales sobre las variables de decisión, $x_1, \ldots, x_n$ se detalla a continuación:

$$h(\pi \mid x_1,\ldots,x_n) = h\left(p_y Y - \sum p_i x_i - F \mid x_1,\ldots,x_n\right)$$

Esta ecuación se puede adaptar al problema de maximización de la rentabilidad esperada, cuando las curvas de respuesta difieren dentro del mismo lote y entre años, para lo que se deben usar diferentes ecuaciones para cada campaña:

$$E[\pi] = \sum_{j=1}^{2} \Phi_j \left[\sum_{i=1}^{z} Area_i * \left[P_v * \left(\alpha_{ij} + \beta_{ij} * N_{ij} + \gamma_{ij} * N_{ij}^2 \right) - P_N * N_{ij} \right] \right]$$

donde: *j* es la campaña de cultivo;

Φ_j es la probabilidad de ocurrencia de cada campaña (húmeda o seca, etc.); y

$Área_i$ es la proporción de área i (i = 1, …, z) dentro del lote.

Para ilustrar la teoría de fertilización de trigo con dosis variable se aplicará la metodología desarrollada por Bongiovanni (2002a), usando dos funciones de producción de dos sitios diferentes. Las respuestas para años promedio y para años húmedos en los dos sitios estudiados se muestran en el **Cuadro 9.6** y en la **Figura 9.1.** Se usarán estas curvas de respuesta, representando dos tipos de suelos distintos dentro de un mismo lote, ocupando cada uno de ellos el 50% del área. Asimismo, se asume una probabilidad de ocurrencia de clima medio o bueno del 50%.

Para este ejemplo, se tomó el precio de trigo para marzo 2003 de 132,2 USD/t, 14% de gastos de comercialización, y un costo de la urea de 0,25 USD/kg, lo que implica un costo del N elemental de 0,61 USD/kg, aplicando la tasa de interés comercial vigente en Argentina en 2002, del 24% anual, por seis meses.

Cuadro 9.6: Respuesta del trigo al N en dos sitios (L y B) y dos campañas

Sitio	Año medio			Año bueno		
	α	β	Y	α	β	Y
L	34.08	0.321	- 0.0022	42.07	0.407	- 0.0028
B	36.12	0.191	- 0.0014	45.1	0.362	- 0.0026

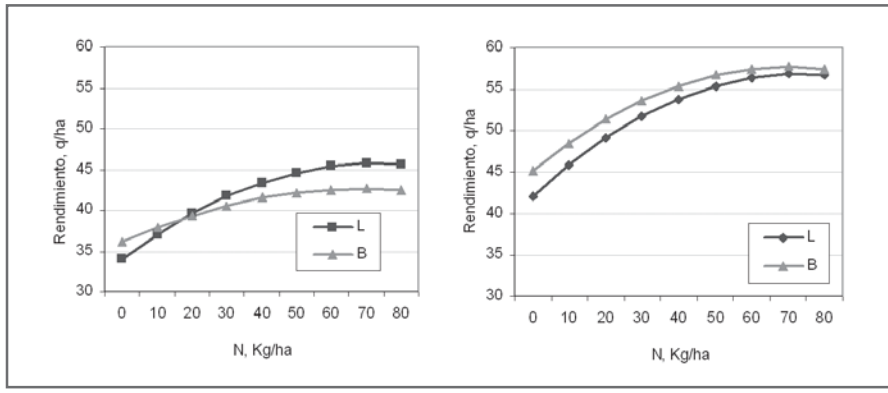


Figura 9.1: Curvas de respuesta del trigo al N en la Loma y en el Bajo (L y B) y en dos campañas (año medio –a la izquierda- y año bueno –a la derecha).

Como resultado de la optimización, la dosis óptima económica en el año normal para el sitio L fue de 61 kg/ha y para el sitio B de 49 kg/ha. Por otro lado, en el año bueno, la dosis óptima para el sitio L fue de 63 kg/ha y para el sitio B de 59 kg/ha. Como se muestra en las Figuras, tanto la respuesta al primer kg de N aplicado (**Figura 9.2**), la dosis óptima de N (**Figura 9.3**), y el retorno al N (**Figura 9.4**) difieren entre zonas y entre años.

.

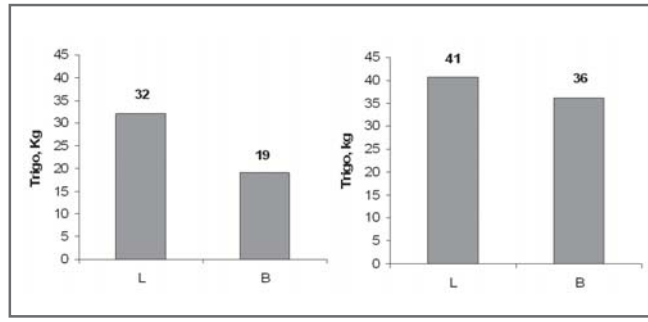


Figura 9.2: Respuesta del trigo al primer kg de N en dos sitios (L y B) y en dos campañas (año medio –a la izquierda- y año bueno –a la derecha).

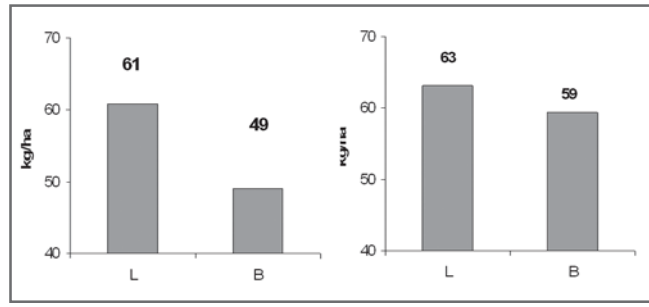


Figura 9.3: Dosis óptima económica de N en dos sitios (L y B) y en dos campañas (año medio – a la izquierda- y año bueno –a la derecha).

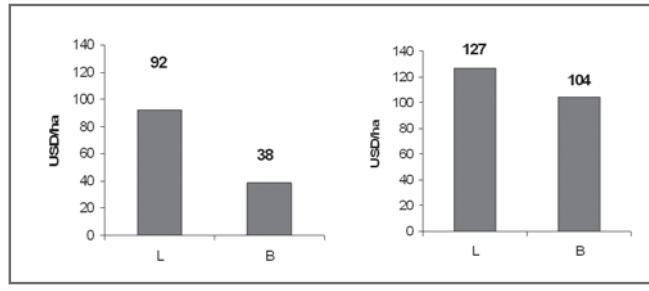


Figura 9.4: Retorno neto esperado a la DV–N en dos sitios (L y B) y en dos campañas (año medio –a la izquierda- y año bueno –a la derecha).

Asumiendo que los dos sitios considerados en este ejemplo, se encuentran dentro del mismo lote, en igual proporción, se puede comparar el resultado de aplicar N con dosis variable, con el resultado de aplicar N con el método tradicional del balance. De acuerdo a Melgar et al. (2001),

por el método del balance, la dosis para el sitio "L" es de 32 kg/ha y de 50 kg/ha para el sitio "B", lo que hace un promedio de 41 kg/ha para todo el lote.

En este contexto, el beneficio extra por usar dosis variable de N (el retorno a DV-N) sería de USD 3,38/ha para el año normal y de USD 10,72/ha para el año húmedo. Es decir, los resultados sugieren que la DV-N puede ser rentable, porque la ganancia para el año normal sería USD 1,38 más alta que el costo extra de aplicar con DV (USD 2/ha), mientras que en el año húmedo esa ganancia neta sería de USD 8,72/ha.

Como la característica de cada campaña (normal / húmeda) es desconocida al momento de la fertilización, se puede usar una probabilidad de ocurrencia, de acuerdo a lo explicado más arriba. Asignando un 50% de probabilidad, el promedio ponderado de las curvas de respuesta indica que la dosis óptima para el sitio L es de 62 kg/ha y de 56 kg/ha para el sitio B. La ganancia extra por usar dosis variable de N sería de 6,76 USD/ha. Por lo tanto, sería más que suficiente para pagar el costo extra de la DV (2 USD/ha) y de generar una ganancia de 4,76 USD/ha para el productor.

Análisis de sensibilidad

La probabilidad de ocurrencia de las campañas de cultivo se puede pronosticar hasta cierto punto. Por lo tanto, asignar probabilidades de 50% a años normales y húmedos puede ser una postura excesivamente conservadora. Por ejemplo, el contenido de humedad en el suelo al momento de la fertilización está correlacionado positivamente con la disponibilidad de agua durante el ciclo del cultivo. Esta información permitiría estimar mejores recomendaciones de fertilización, teniendo en cuenta el riesgo.

Para estimar el valor de estos pronósticos en la implementación de la DV, se pueden considerar cuatro escenarios:

i) Esperar una campaña normal, y que sea normal (*Normal-Normal*). Esto se realiza usando tanto las curvas de respuesta como las dosis óptimas para la campaña normal;

ii) Esperar una campaña normal, y que sea húmeda (*Normal-Húmeda*), es decir, las dosis óptimas para la campaña normal, pero las curvas de respuesta para la campaña húmeda;

iii) Esperar una campaña húmeda, y que sea húmeda (*Húmeda-Húmeda*), es decir, usando tanto las curvas de respuesta como las dosis óptimas para la campaña húmeda; y

iv) Esperar una campaña húmeda, y que sea normal (*Húmeda-Normal*), es decir, las dosis óptimas para la campaña húmeda, pero las curvas de respuesta para la campaña normal.

Los resultados indican que si el tipo de campaña se pudiera predecir correctamente, los resultados serían rentables. Y aunque la predicción fuera incorrecta, la DV-N también seguiría siendo rentable, ya que el retorno a la DV-N solamente cae entre un 26% y un 15%, pero sigue por encima del costo de 2 USD/ha (**Cuadro 9.7**).

Por otro lado, los resultados indican que para que la rentabilidad de la DV sea equivalente a la rentabilidad de la dosis uniforme, el pronóstico debe tener una certeza de por lo menos el 50%.

Con respecto al precio del trigo, la DV-N seguiría siendo rentable si el precio cayera un 10% (de 132,2 USD/t a 118,98 USD/t) en una campaña normal, un 37% (de 132,2 USD/t a 83,29 USD/t) en una campaña húmeda, y en un 26% (de 132,2 USD/t a 97,83 USD/t) para el promedio de las dos campañas.

Cuadro 9.7: Retornos a la DV-N basados en el análisis de sensibilidad.

Estrategia de fertilización	Normal-Normal	Normal-Húmedo	Húmedo-Húmedo	Húmedo-Normal
	USD / ha			
Dosis uniforme (41 kg/ha)	459	459	598	598
Dosis variable - USD 2/ha	462	462	609	607
Costo de indiferencia de la DV	3	2	11	9

Conclusiones

Los resultados de los estudios de fertilización del trigo con N realizados en dos sitios, y en dos campañas de cultivo indican que:

1. La respuesta al N y las dosis óptimas fueron diferentes entre sitios;
2. La dosis variable de N puede ser rentable, considerando el costo extra de 2 USD/ha que cobra el contratista; y
3. La respuesta al N y las dosis óptimas por sitio difieren entre años.

Además, el análisis indica que se puede realizar la optimización económica cuando las respuestas difieren dentro del lote. Se debe tener en cuenta que se trata de un análisis "ex-post", es decir, se asume que la respuesta del cultivo al N se conoce al momento de realizar la fertilización. A pesar de que la respuesta esperada nunca se va a conocer con certeza, un análisis económico de este tipo es el punto de partida que permite comenzar a comprender las implicaciones del manejo sitio-específico.

Para mayor detalle, consultar los protocolos de análisis descriptos en Bongiovanni (2002b).

EJEMPLOS DE BENEFICIOS DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN LA GESTIÓN

A modo de ejemplo, se pueden citar algunos beneficios de la AP en la gestión de la siembra, la fertilización, la cosecha y la planificación. Para comprender mejor la terminología es necesario aclarar, que el margen bruto (MB) es igual al valor de la producción (precio por cantidad), menos los costos directos (labores culturales, semilla, agroquímicos, fertilizantes y cosecha) y los de comercialización.

Algunas de estas ideas fueron adaptadas de AgLeader (2005).

En la siembra

- ¿Cómo saber si la AP es rentable en la siembra? Si con el monitor de rendimiento se logra identificar un híbrido de maíz que rinde más que otro híbrido en las partes más bajas de un lote (ej.: 0,3 t/ha), el beneficio sería 77 USD/t x 0,3 t/ha = 23 USD/ha ó 10% del margen bruto.

- ¿Cómo influye la velocidad de siembra sobre el rendimiento? Se estima que cuando la velocidad de siembra supera los 8 km/h, el rendimiento puede disminuir hasta en 1,4 t/ha. El beneficio de controlar este aspecto a través de un "registrador satelital de siembra" sería de 77 USD/t x 1,4 t/ha = 108 USD/ha ó 47% del margen bruto.

- ¿Cómo repercuten los errores de siembra? Se calcula que pueden causar una disminución del rendimiento del 0,5%, lo que se traduce en una caída del 1,5% promedio en los márgenes brutos de los principales cultivos, ó 3,4 USD/ha.

- Ensayos a campo indican que los suelos más ricos soportan una densidad de maíz mayor, aumentando el rendimiento en 0,6 t/ha. Asimismo, con menor densidad en los suelos más pobres, se mantiene el rendimiento con menos semilla. Teniendo en cuenta sólo el mayor ingreso, sería un beneficio de 77 USD/t x 0,6 t/ha = 46 USD/ha ó 20% del margen bruto.

- Evaluar sistemas de siembra. Por ej. los mapas de rendimiento permiten determinar diferencias de rendimiento con siembra directa en soja de 0,7 t/ha, es decir 0,7 t/ha x 167 USD/t = 117 USD/ha ó 37% del MB.

- Ensayos de siembra de diferentes grupos de madurez de soja en diferentes zonas de manejo realizados en Río Cuarto, Argentina, también mostraron diferencias de rendimiento de 0,7 t/ha x 167 USD/t = 117 USD/ha ó 37% del MB.

- El tratamiento de enfermedades de final de ciclo en soja por zonas de manejo ha demostrado diferencias de rendimiento de 0,18 t/ha x 167 USD/t = 30 USD/ha ó 9% del MB.

- Ensayos de espaciamiento entre hileras a 0,26 y 0,52 m en soja demostraron que el uso de sembradoras de grano fino (*drill*) en zonas de manejo de bajo potencial de rendimiento, y de grano grueso (*planter*) en zonas de alto potencial, puede aumentar el rendimiento en 0,45 t/ha x 167 USD/t = 75 USD/ha ó 24% del MB.

En la fertilización y aplicación

- El ejemplo del análisis económico de la dosis variable de N en maíz por el método del balance citado más arriba muestra un beneficio de 12,43 USD/ha ó 5,4% del MB, mientras que el ejemplo del análisis económico de la dosis variable de N en trigo por el método de la curva de respuesta muestra un beneficio de 1,38 USD/ha para el año normal (1% del MB) y de 8,72 USD/ha (6,5% del MB) para el año húmedo.

- ¿Se pueden reducir superposiciones? Muchas pulverizadoras autopropulsadas con botalones de 20 m se superponen hasta 1 m entre pasadas. En 1000 ha son 50 ha de superposición. Con la ayuda de los sistemas de guía por GPS (banderillero satelital), la superposición se reduce a 10 cm. En 1000 ha son sólo 5 ha de superposición. Asumiendo un costo promedio 30 USD/ha x 45 ha, sería un ahorro de 1350 USD en 1000 ha, ó 1,35 USD/ha, ó 0,6% del MB ponderado.

- ¿Se pueden reducir las áreas no aplicadas por error? Estas áreas ó "chanchos" pueden significar una reducción de más del 1,5% del rendimiento. En un maíz de 1 t/ha: 77 USD/t x 0,015 t/ha = 1,16 USD/ha ó 0,5% del MB.

- Si se suma el beneficio de 1,35 USD/ha por reducir superposiciones, con los 1,16 USD/ha por reducir áreas no tratadas, implica que con sólo trabajar 2789 ha se paga un sistema de guía por GPS de USD 7000. Esta superficie es un 20-30% de lo que trabaja anualmente un contratista profesional.

En la cosecha

- La información de rendimiento permite poner un valor a la tierra por productividad. Teniendo en cuenta un precio de la tierra de 5000 USD/ha, y si con los mapas se le demuestra a un potencial comprador o arrendatario que el campo rinde 10% más que los vecinos, el precio podría ser un 5% más alto, un beneficio de 250 USD/ha.

- Conocer en forma instantánea la humedad y la cantidad del grano que se cosecha permite tomar decisiones sobre el destino que se le dará a lo cosechado, teniendo en cuenta la necesidad de secado y la capacidad de almacenaje disponible. Permite ahorrar transporte y evita parar la cosecha.

- El mapa de rendimiento en tiempo real permite visualizar la variabilidad sobre la marcha; determinar qué afecta el rendimiento (insectos, manchones, malezas, etc.) y poder analizar soluciones al problema. Si la variabilidad se debe a un problema de la cosechadora, como por ejemplo, pérdidas de cosecha por una zaranda tapada, el operario puede corregir la falla y evitar pérdidas de 1 t/ha de soja, lo que representa 77 USD/ha ó 33% del MB.

- El monitor de rendimiento también puede detectar problemas con el momento oportuno de cosecha. Lotes de soja cosechados en el área de INTA Manfredi (Argentina) después de un temporal muestran diferencias de 1 t/ha de soja, ó 77 USD/ha ó 33% del MB.

- La excesiva velocidad de avance u otros problemas de regulación de la cosechadora también se pueden detectar con el monitor de rendimiento.

En la planificación

- Un GIS puede ayudar a determinar cuánta semilla (y/o fertilizante) se necesita en cada lote o zona de manejo. En este caso, el beneficio proviene de una mejor organización de las operaciones a campo (mayor eficiencia). Asimismo, permite controlar los costos, ya que conocer la cantidad de insumos necesaria, permite tomar mejores decisiones para la siembra.

- Los mapas de elevación digital permiten estudiar el lote en tres dimensiones. Ayudan a estudiar las vías de escurrimiento y otros aspectos relacionados a la elevación. El beneficio radica en una mejor comprensión de las dinámicas del lote.

- Máximo rendimiento no, máxima rentabilidad sí. Con un GPS y un GIS se pueden registrar el costo de insumos y los rendimientos por zonas de manejo. Esto permite hacer mapas de rentabilidad por zonas. La información permite optar entre la producción intensiva con AP o seguir con la convencional.

- Crear zonas de manejo por rendimientos normalizados. Los mapas de rendimiento de varios años permiten crear un mapa promedio para determinar zonas de manejo.

- Imágenes satelitales y fotografías aéreas para tomar mejores decisiones. También muestran la ubicación de los lotes para que los contratistas identifiquen el lugar. Indican la posición relativa con respecto a calles, rutas, ríos, poblaciones, etc. Las imágenes georeferenciadas y el mapa se superponen automáticamente. El beneficio es una mejor comunicación.

CONTRATISTAS

Una de las decisiones claves que tienen que tomar los productores que quieran adoptar la AP es si van a contratar los servicios, o si se van a capacitar para desarrollar por sí mismos las habilidades necesarias para la recolección de datos, análisis y manejo de la variabilidad. En ciertos casos, los contratistas pueden ofrecer el servicio en forma más económica, como ser cuando se exige una gran inversión de capital que debe distribuirse sobre varios campos para que sea rentable, ej.: una cosechadora con monitor de rendimiento y GPS.

En otros casos, la decisión es una cuestión de tiempo disponible, y como todo productor ya sabe, el tiempo es dinero.

Hay dos factores principales a considerar: ¿hay contratistas en tiempo y forma?; ¿se cuenta con la mano de obra necesaria para hacer el trabajo extra que requiere la AP? Por lo general, se limita a una elección entre dos opciones, una de bajo nivel tecnológico que requiere más tiempo, y otra de alto nivel tecnológico que es más rápida, pero más cara. También se debe tener en cuenta la calidad y la confiabilidad del trabajo realizado.

El tiempo también tiene un costo de oportunidad asociado, como lo es en el caso del capital. En el momento de la siembra y de la cosecha el costo de oportunidad del tiempo es muy elevado, mientras que en el resto del año es mucho menor.

En el caso de aquellas tareas que exigen el desarrollo de nuevas habilidades, como lo es el análisis de los datos del monitor de rendimiento, se tendrá que tomar una decisión estratégica entre contratar el servicio o realizarlo dentro de la empresa. Comparado con los otros costos de producción, el costo de una computadora y de un software para el análisis de datos no es elevado, pero el tiempo y esfuerzo requeridos para realizar el análisis puede ser alto.

La AP puede ser analizada como cualquier otra tecnología innovadora. La información es un insumo en el proceso productivo, tal como lo son la semilla, el fertilizante, los agroquímicos o el combustible. La información tiene valor si conduce a tomar mejores decisiones. Si la información se usa por varios años, debe ser tratada como cualquier otro bien de capital. En la mayoría de los casos es más difícil estimar los beneficios que los costos de la AP. La rentabilidad de la AP es específica de cada sitio, por lo que los márgenes varían entre sitios debido a la variabilidad de los suelos, historia de manejo, microclima y otros factores.

PRONÓSTICO DE ADOPCIÓN DE LA AP

Limitantes para la adopción

Griffin et al. (2004) identificaron algunas limitantes claves para la adopción de la AP, comparando el caso de la biotecnología y el de la AP. La pregunta clave que los usuarios actuales y potenciales se formulan es si las estrategias de manejo basadas en el "conocimiento intensivo" son rentables, o si es mejor continuar con la estrategia de usar el "conocimiento empaquetado".

El "conocimiento intensivo" se refiere a las estrategias de manejo que dependen de datos a nivel del lote y del establecimiento para tomar decisiones sobre aplicación de insumos y prácticas de cultivo. Esos datos pueden ser obtenidos manualmente o electrónicamente. Ejemplos del uso del "conocimiento intensivo" son la dosis variable de fertilizantes y la densidad de siembra variable.

Por otra parte, en las estrategias de "conocimiento empaquetado", la información se compra en forma de insumo, y el usuario (productor) requiere una cantidad mínima de datos adicionales, como por ejemplo, el maíz Bt y la soja Round-up Ready. Para aplicar exitosamente estas nuevas

tecnologías se necesitan relativamente pocas habilidades, porque la tecnología viene en forma de "conocimiento empaquetado", y no requiere la compra de nuevos equipos ni de conocimientos adicionales para el manejo del cultivo.

Las tecnologías basadas en el "conocimiento intensivo" que caracterizan a la AP no sólo requieren una inversión en tiempo, sino que también son sensibles a la escala. Para un productor que gasta unos USD 200.000 en un equipo de cosecha, el monitor de rendimiento con GPS representa tan sólo el 3,5% de la inversión. Sin embargo, la diferencia radica en el área sobre la que se pueden distribuir los costos, incluido el costo del capital humano. Por ejemplo, si alguien se capacita para interpretar mapas de rendimiento para un establecimiento de 2.000 ha, seguramente lo va a poder hacer también sobre 20.000 ha, pero el costo por ha va a ser mucho menor.

Incentivos para la adopción

Hay muchos estudios que dan razones para no adoptar la AP y son pocos los que la incentivan (Griffin et al., 2004). Sin embargo, hay que tener en cuenta que los costos de la tecnología de la información (hardware y software) están en constante disminución, a la vez que su capacidad está en aumento. En el mundo actual, la gente incorpora cada vez más la tecnología de información a sus vidas cotidianas, como ser las computadoras, el GPS y los teléfonos celulares.

En los países del Cono Sur de América, los incentivos para adoptar la AP vienen más por el lado del monitoreo y gerenciamiento de la producción y de los operarios, que por el lado de la dosis variable. Por ejemplo, en Argentina, la alta adopción del monitor de rendimiento antes que de la dosis variable, se debe a que ha probado ser una excelente herramienta de diagnóstico agronómico y de administración de la maquinaria agrícola. Además, los beneficios de los sistemas de guía por GPS con respecto a la reducción de superposiciones y de áreas mal aplicadas son claros en Argentina y Brasil, donde se aplican grandes superficies.

Potencial para consultores-asesores

Según Griffin et al. (2004), la teoría de las redes de externalidades que se forman a partir de la tecnología de la información juegan un rol muy importante para comprender la adopción de la AP.

Las redes de externalidades se definen como "una forma especial de externalidad en la que la utilidad de una persona por un bien depende de la cantidad de otras personas que consuman ese bien" (Varian, 1996). Un ejemplo de esos bienes son el fax, los celulares y el módem. Un efecto indirecto de las redes de externalidades surge con respecto a los bienes y servicios complementarios. Por ejemplo, en áreas donde no hay locales comerciales donde alquilar videos, una reproductora de video tiene un bajo valor relativo para los consumidores, y viceversa.

Siguiendo a Griffin et al. (2004), este ejemplo se puede hacer extensivo a las tecnologías de AP y a los servicios de asesoramiento (consultoría), tomados como un servicio complementario con respecto a la adopción de la AP. Si no hay servicios de consultores agronómicos que analicen los datos de AP y que brinden recomendaciones a los productores, entonces hay pocos incentivos a que los productores adopten la tecnología. Por otra parte, si los productores no están adoptando AP, tampoco habrá incentivo para la aparición de nuevas consultoras que ofrezcan servicios de análisis de datos y de asesoramiento. En este caso, una alternativa para la adopción puede ser un consorcio de productores que junten la información de varios establecimientos y justifiquen la existencia de un asesor especialista en el tema, que entre otras cosas, pueda realizar ensayos a campo.

CONCLUSIONES

La principal pregunta es, si la agricultura basada en el "conocimiento intensivo" va a ser rentable en el futuro. El objetivo de este libro no es promover la adopción a ciegas de la AP ni de cualquier otra tecnología, sino el de educar a productores y asesores para cuando tengan que tomar decisiones.

Dentro de las limitantes para la adopción de la AP que se citan en la bibliografía (Kitchen et al., 2002; Wiebold, 1998) se destacan: el tiempo para capacitarse en el manejo del equipo y del software; la falta de habilidades de electrónica; la falta de capacitación de productores y asesores; el vínculo que tiene que haber entre la toma de datos y las recomendaciones; la falta de asistencia técnica; la falta de asesores capacitados; los datos en diferente formato; el análisis de los datos del monitor de rendimiento; la dificultad de obtener datos de calidad; ensayos básicos para relacionar el rendimiento con las condiciones del suelo; la falta de maquinaria de AP; análisis estadístico; software disponible; y análisis de rentabilidad.

Estas barreras para la adopción deben ser vistas como oportunidades para el desarrollo y como áreas potenciales de trabajo, tanto para extensionistas de la actividad pública como para consultores de la actividad privada.

Bullock et al. (2002) señalan que la agricultura de precisión tiene ciertos problemas de adopción comercial, en parte porque no hay información suficiente como para apoyar las decisiones de tipo sitio-específicas, y porque la información que hay no se usa eficientemente. Asimismo, pronostican que a medida que haya más información disponible sobre cómo usar la tecnología de precisión en forma rentable, los productores van a comenzar a demandar más equipos. Las instituciones públicas tienen un rol importante en la generación y desarrollo de esta información, implementando formas de crear mapas de manejo de bajo costo (por ej.: usando topografía, sensores remotos, etc.), y poniendo en práctica métodos económicos de ensayos a campo de productores (usando mapas de rendimiento, sistemas de información geográfica y programas de regresión espacial).

REFERENCIAS

AgLeader. 2005. How Do You Know if Precision Ag Really Pays. http://www.agleader.com/sales-bpa.htm

Bongiovanni, R. 2002a. A Spatial Econometric Approach to the Economics of SiteSpecific Nitrogen Management in Corn Production. Ph.D. Thesis, Agricultural Economics, Purdue University. 306 pp. http://www.agriculturadeprecision.org/

Bongiovanni, R. 2002b. Econometría espacial: una herramienta clave para el manejo sitio-específico de insumos. En: Actas del Tercer Taller Internacional de Agricultura de Precisión del Cono Sur de América, 17-19 Diciembre 2002, Carlos Paz, Argentina. http://www.agriculturadeprecision.org/

Bongiovanni, R. y Lowenberg-DeBoer, J. 2004. "Precision Agriculture and Sustainability." Journal of Precision Agriculture 5, 359–387, 2004 (August 2004). http://www.wkap.nl/prod/j/1385-2256. http://www.agriculturadeprecision.org/

Bullock, D.S.; Swinton, S. y Lowenberg-DeBoer, J. 2002. "Can Precision Agricultural Technology Pay For Itself? The Complementarity of Precision Agriculture Technology and Information". Forthcoming in *Agricultural Economics*, published by the International Association of Ag Econ.

Fountas, S.; Ess, D.R.; Sorensen, C.G; Hawkins, S.E.; Pedersen, H.H.; Blackmore, B.S. y Lowenberg-DeBoer, J. 2003. "Information Sources in Precision Agriculture in Denmark and the USA", A. Werner and A. Jarfe ed. Precision Agriculture: Proceedings of the 4th European Conference on Precision Agriculture, J. Staff Paper. Department of Agricultural Economics, Purdue University.

Griffin, T.W.; Lowenberg-DeBoer, J.; Lambert, D.M.; Peone, J.; Payne, T. y Daberkow, S.G. 2004. Adoption, Profitability, and Making Better Use of Precision Farming Data. Staff Paper #04-06. Department of Agricultural Economics, Purdue University.

Griffin, T.W. y Lowenberg-DeBoer, J. 2005. Yield Monitor Data Analysis. SSMC September www.purdue.edu/ssmc

Kitchen, N.R.; Snyder, C.J.; Franzen, D.W. y Wiebold, W.J. 2002. Educational Needs of Precision Agriculture. 2002. December 2002, Volume 3, Issue 4.

Longo, L. y Gaviria, R. 2002. Principios de Economía, página 58. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. 182 pp. ISBN 950-29-0689-6.

Lowenberg-DeBoer, J. 1997. A bumpy road to the adoption of precision agriculture. Purdue Agricultural Economics Report. Nov. 1997. http://www.agecon.purdue.edu/extension/pubs/paer/pre_98/paer1197.pdf

Lowenberg-DeBoer, J. (ed.). 2000. Precision Farming Profitability. Purdue University, West Lafayette, IN. 1st Edition. ISBN 0-931682-84-3. 132 p. www.purdue.edu/ssmc

Lowenberg-DeBoer, J. 2005. New Grain and Soil Sensors at the 5th European Precision Agriculture Conference. SSMC Newsletter July 2005. www.purdue.edu/ssmc

Lowenberg-DeBoer, J. y Urcola, H. 2003. How Should Yield Monitor Data Be Combine With Other Information Sources In Choosing Hybrids And Varieties? SSMC Newsletter January www.purdue.edu/ssmc

Melgar, R.; Camozzi, M.E.; Guevara, E.; Lavandera, L. y Lavandera, J. 2001. Fertilización nitrogenada de cereales en la región pampeana: validación de modelos de recomendación.

Proyecto Profertil. 15 pp. http://www.fertilizar.org/

Obschatko, E.S. 2003. El aporte del sector agroalimentario al crecimiento económico argentino 1965-2000. P. 104ss. IICA. ISBN 987-9159-06-3.

OCDE, 1994. National Systems of Innovation: General Conceptual Framework. DSTI/STP/TIP (94), 4, Francia.

Reca, L. y Parellada, G. 2001. El sector agropecuario argentino. Editorial FAUBA, Buenos Aires. ISBN 950-29-0640-3, 150 p.

Vanacht, M. 2001. The Changing Business of Precision Agriculture. In: Reetz, H. (ed.) Conference Proceedings CD. InfoAg 2001. Indianapolis, Indiana, August 7-9, 2001.

Varian, H.R. 1996. Intermediate Microeconomics: A Modern Approach. 4th edition. W.W. Norton and company, New York City, NY.

Wiebold, W.J; Sudduth, K.A.; Davis, J.G.; Shannon, D.K. y Kitchen, N.R. 1998. Determining Barriers to Adoption and Research Needs of Precision Agriculture http://www.fse.missouri.edu/MPAC/pubs/parpt.pdf

ANEXOS

Cuadro 9.8: Plantilla de presupuesto parcial para estimar los beneficios del uso del monitor de rendimiento en la elección de híbridos, variedades y otras prácticas de manejo (1).

Ítem	Unidad	Cantidad	Precio unitario USD	Monto/ha USD/ha
Cambio en los ingresos brutos				
Aumentos de rendimiento en el establecimiento (2)				
Maíz				
Soja				
Trigo				
Otros cultivos				
Cambios en los precios (por mejor calidad, etc.) (3)				
Nitrógeno				
Maíz				
Soja				
Trigo				
Otros cultivos				
Cambio total en el ingreso bruto anual (sumatoria)				
Cambio en los costos				
Costos anualizados de equipos y bienes durables (4)				
Monitor de rendimiento (vida útil = años) (5)				
GPS (vida útil = años) (5)				
Software (vida útil = años) (5)				
Capacitación (vida útil = años) (5)				
Otros (vida útil = años) (5)				
Cambio en los costos variables				
Corrección diferencial DGPS				
Mantenimiento y reparaciones				
Honorarios del asesor				
Insumos extras				
Otros				
Cambio total en el costo anual (sumatoria)				
Margen bruto parcial del establecimiento (Cambio total en el ingreso bruto menos cambio total en el costo anual)				
Margen bruto parcial por ha (dividir el margen bruto parcial del establecimiento por las ha cultivadas)				

Adaptado de Precision Farming Profitability, Lowenberg-DeBoer (ed.), 2000

1 Los otros beneficios del uso del monitor de rendimiento son el diagnóstico de problemas del cultivo (ej., plagas, etc.). Los presupuestos parciales para estimar los beneficios en estos casos requieren algunas líneas adicionales, que contemple los costos de implementar las soluciones, como ser el control químico, etc.

2 La cantidad en esta línea debería ser el cambio en producción de todo el establecimiento.

3 El precio aquí debería ser el cambio en precios por cultivo que se logra para todo el establecimiento. La cantidad debería ser el monto de grano cuyo precio subió.

4 Aquí se debe incluir todo lo que se usa por más de un año.

5 La mayoría de estos ítems se transforman en obsoletos antes de desgastarse. Se sugiere una estimación conservadora de tres años. El monto, en este caso, es el costo anualizado. La forma más simple de calcular el costo anualizado es sumar la depreciación y el costo de oportunidad del capital. Si el ítem no tiene valor residual, el método de depreciación lineal sería el precio de compra, dividido por la vida útil. El costo de oportunidad del capital es la tasa de retorno en inversiones alternativas, multiplicado por el precio de compra.

Cuadro 9.9: Plantilla de presupuesto parcial para estimar los beneficios de la dosis variable de fertilizantes.

Ítem	Unidad	Cantidad	Precio unitario USD	Monto/ha USD/ha
Cambio en los ingresos brutos				
Aumentos de rendimiento en el establecimiento (1)				
Maíz				
Soja				
Trigo				
Otros cultivos				
Cambios en los precios (por mejor calidad, etc.) (3)				
Nitrógeno				
Maíz				
Soja				
Trigo				
Otros cultivos				
Cambio total en el ingreso bruto anual (sumatoria)				
Cambio en los costos				
Costos anualizados de equipos y bienes durables (2)				
Sistema de dosis variable (vida útil = años) (3)				
GPS (vida útil = años) (3)				
Software (vida útil = años) (3)				
Capacitación (vida útil = años) (3)				
Otros (vida útil = años) (3)				
Cambio en los costos variables (4)				
Muestreo de suelos y análisis				
Costo extra de realizar dosis variable				
Honorarios del asesor				
Corrección diferencial DGPS				
Mantenimiento y reparaciones				
Insumos extras				
Fertilizantes y enmiendas				
N				
P				
K				
Micronutrientes				
Otros (Secado o transporte de la producción extra)				
Cambio total en el costo anual (sumatoria)				
Margen bruto parcial del establecimiento (Cambio total en el ingreso bruto menos cambio total en el costo anual)				
Margen bruto parcial por ha (dividir el margen bruto parcial del establecimiento por las ha cultivadas)				

Adaptado de Precision Farming Profitability, Lowenberg-DeBoer (ed.), 2000

1 La cantidad en esta línea debería ser el cambio en producción de todo el establecimiento. Si el principal beneficio del manejo espacial es la disminución de la cantidad de fertilizante utilizada, los cambios de rendimiento deberían ser cero.

2 Aquí se debe incluir todo lo que se usa por más de un año.

3 Ver: "1. Estimación de los cambios en costos", en el capítulo "Viabilidad Económica".

4 Estos son costos incrementales. El costo de muestreo y análisis de suelo debe ser prorrateado en el ciclo de muestreo (ej.: 4 años).

5 Muchos fertilizantes tienen efectos residuales. Si el campo hace una rotación maíz/soja (50/50) y un sistema constante de muestreo y fertilización (ej.: P y K cada dos años, etc.), lo más simple sería poner los gastos anuales promedio. En cambio, si el área, la dosis de fertilizantes, o el ciclo de muestreo varían entre años, los costos de fertilización deben prorratearse de la misma forma que los costos de la maquinaria y equipos. Se pueden considerar aumentos o disminuciones de costos en todos los ítems. Si se reduce la cantidad de fertilizante, la cantidad será negativa y el monto representa un ahorro.

Cuadro 9.10: Plantilla de presupuesto parcial para estimar los beneficios del control de malezas con dosis variable (1).

Ítem	Unidad	Cantidad	Precio unitario USD	Monto/ha USD/ha
Cambio en los ingresos brutos				
Aumentos de rendimiento en el establecimiento (2)				
Maíz				
Soja				
Trigo				
Otros cultivos				
Cambio total en el ingreso bruto anual (sumatoria)				
Cambio en los costos				
Costos anualizados de equipos y bienes durables (3)				
Sistema de dosis variable (vida útil = años) (4)				
GPS (vida útil = años) (4)				
Software (vida útil = años) (4)				
Capacitación (vida útil = años) (4)				
Otros (vida útil = años) (4)				
Cambio en los costos variables (5)				
Corrección diferencial DGPS				
Costo extra de realizar dosis variable				
Honorarios del asesor				
Mantenimiento y reparaciones				
Insumos extras				
Herbicidas (6)				
Otros (Secado o transporte de la producción extra)				
Cambio total en el costo anual (sumatoria)				
Margen bruto parcial del establecimiento (Cambio total en el ingreso bruto menos cambio total en el costo anual)				
Margen bruto parcial por ha (dividir el margen bruto parcial del establecimiento por las ha cultivadas)				

Adaptado de Precision Farming Profitability, Lowenberg-DeBoer (ed.), 2000

1 Los beneficios pueden incluir el control por manchones de malezas y/o la dosis variable de herbicidas en un lote.

2 La cantidad en esta línea debería ser el cambio en producción de todo el establecimiento. Si el principal beneficio del manejo espacial es la disminución de la cantidad de herbicida utilizada, los cambios de rendimiento deberían ser cero.

3 Aquí se debe incluir todo lo que se usa por más de un año.

4 La mayoría de estos ítems se transforman en obsoletos antes de desgastarse. Se sugiere una estimación conservadora de tres años. El monto, en este caso, es el costo anualizado. La forma más simple de calcular el costo anualizado es sumar la depreciación y el costo de oportunidad del capital. Si el ítem no tiene valor residual, el método de depreciación lineal sería el precio de compra, dividido por la vida útil. El costo de oportunidad del capital es la tasa de retorno en inversiones alternativas, multiplicado por el precio de compra.

5 Estos son costos incrementales. Por ej., si el establecimiento ya paga corrección diferencial DGPS para el monitoreo de rendimiento, entonces el costo de usar la señal DGPS para el control de malezas puede ser cero.

6 Puede haber aumento o disminución de costos en cualquier ítem. Puede haber ahorro de herbicidas si se aplica la misma dosis, pero en un área menor.

CAPÍTULO 10

ADOPCIÓN DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN EL CONO SUR DE AMÉRICA

10.1. AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN ARGENTINA

Rodolfo Bongiovanni (1) **y Jess Lowenberg-DeBoer** (2)
(1) INTA Manfredi, Argentina
rbongiovanni@correo.inta.gov.ar
(2) Director of the Site-Specific Management Center
Purdue University, USA
lowenbej@purdue.edu

INTRODUCCIÓN

La agricultura de precisión no mejora el mercado de precios de las commodities, ni soluciona los problemas de transporte o de crédito agropecuario, pero los productores argentinos se interesan en la agricultura de precisión como una tecnología que les permite producir más eficientemente. Los productores argentinos, como los del resto del mundo, también se preguntan cuáles de las herramientas disponibles son de aplicación práctica en cada caso en particular, y principalmente, cuáles son más rentables.

Los monitores de rendimiento, los sistemas de guía por GPS y las imágenes satelitales son las tecnologías más adoptadas en el país, debido a que son herramientas que muestran beneficios inmediatos. Por otra parte, la dosis variable no ha sido muy adoptada, principalmente porque no se cuenta con toda la información necesaria para realizar prescripciones por zonas de manejo.

Dentro de los factores limitantes para la adopción se pueden mencionar: (a) el alto costo de la inversión; (b) el alto riesgo de la producción que enfrentan los productores argentinos con respecto a los productores subsidiados de países desarrollados; (c) menor variabilidad inducida con respecto a países con mayor historia de agricultura y (d) uso generalizado de contratistas.

Los factores que incentivan la adopción son: (a) establecimientos productivos de grandes extensiones; (b) relativamente alta relación capital / mano de obra; (c) gerentes agrícolas altamente capacitados; (d) tecnología disponible del exterior; (e) desarrollos tecnológicos locales; (f) alto valor de la información brindada por los mapas de rendimiento; y (g) facilidad de compartir la información entre grupos de productores.

Los sensores remotos se usan cada vez más en Argentina, para: (a) obtener exenciones impositivas en caso de inundaciones; (b) determinar la calidad de la tierra y el riesgo de inundación antes de alquilar o comprar; y (c) establecer zonas de manejo por aptitud de suelos, índices verdes, topografía, etc. Argentina tiene su propio satélite de observación, el SAC-C, aunque con una resolución de 175 m.

El potencial de la agricultura de precisión en Argentina es el de aumentar la rentabilidad a través de un aumento del valor del rendimiento (cantidad o calidad), de una reducción en la cantidad de insumos, o de ambos simultáneamente. Los monitores de rendimiento también se usan como una herramienta para diagnosticar problemas de malezas, pestes, enfermedades, napas de agua subterránea, fertilidad, salinidad, diferencias en sistemas de labranza, etc. Por lo tanto, es una herramienta de ayuda para la toma de decisiones en la gestión de la empresa agropecuaria. Las tecnologías de la agricultura de precisión permiten satisfacer una de las exigencias de la agricultura argentina: el manejo óptimo de grandes extensiones.

POTENCIAL DE ADOPCIÓN EN ARGENTINA

La difusión de la agricultura de precisión en Argentina comenzó a principios de 1996 en el INTA Manfredi, Córdoba, con el lanzamiento de lo que hoy es el Proyecto Nacional de Agricultura de Precisión. Este proyecto alcanzó nivel nacional en 1999 y actualmente incluye cinco estaciones experimentales ubicadas en cuatro provincias (Buenos Aires, Córdoba, Santa Fé y Entre Ríos), con la coordinación en la Estación Experimental Agropecuaria Manfredi, Córdoba. Las principales actividades de este proyecto son la experimentación adaptativa y la extensión.

Dentro de las actividades de extensión se encuentran cursos de capacitación para productores y profesionales en el uso de software GIS, mapas de rendimiento, etc, al mismo tiempo que se ofrecen cursos para operarios de equipos de agricultura de precisión. En Abril de 2001, el proyecto lanzó un sitio web: www.agriculturadeprecision.org, con información actualizada sobre las tecnologías de la agricultura de precisión y la investigación que se lleva a cabo en la Argentina. La página web recibe unas 250.000 visitas anuales.

Actualmente, se están conduciendo ensayos de experimentación adaptativa en toda el área de influencia del proyecto, por grupos interdisciplinarios, destinados a demostrar el efecto de diferentes prácticas de manejo sobre la rentabilidad de los diferentes cultivos. Los ensayos se llevan a cabo en colaboración con la Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa (AAPRESID), el Instituto del Potasio y el Fósforo del Cono Sur (INPOFOS), la Universidad Católica de Córdoba (UCC), y empresas privadas como la Aceitera General Deheza (AGD), Agro Servicios Pampeanos (ASP), etc.

En el INTA Manfredi también funciona un proyecto de investigación de tres años de duración (PICTO 12931) financiado en partes iguales por el INTA y la Secretaría de Ciencia, Técnica e Innovación Productiva (SeCTIP), cuyo objetivo es estudiar cómo puede contribuir la agricultura de precisión a la sustentabilidad de la agricultura. La propuesta del proyecto es conducir ensayos en diferentes ubicaciones geográficas y en campañas con diferentes características climáticas, estudiando los resultados para crear una serie de recomendaciones de extensión. El principal resultado esperado es información conducente a mejorar la competitividad del maíz, cultivo fundamental para la sustentabilidad de la agricultura.

Como se puede observar en el **Cuadro 10.1**, tanto monitor de rendimiento como banderillero satelital han sido una de las tecnologías de la agricultura de precisión más adoptadas en nuestro país, mientras que la dosis variable muestra una adopción lenta pero sostenida, en la medida en que se van identificando los factores limitantes de rendimiento y se prescriben las recomendaciones adecuadas para cada zona de manejo.

Sistema de posicionamiento global (GPS)

La señal correctora diferencial DGPS mencionada anteriormente es brindada por una empresa privada, D&E, que provee una señal DGPS de amplitud modulada (AM) por USD 300 por año, o USD 900 de por vida (+IVA). Transmiten mediante tres antenas: una en San Carlos Sur (Santa Fé), otra en Bolívar (Buenos Aires) con 500 km de radio de cobertura; y una nueva en Las Lajitas, con 250 km radio. Esta empresa es el representante local de varias empresas norteamericanas y europeas de software y hardware de agricultura de precisión. La señal correctora DGPS satelital también está disponible por USD 2.000 (+IVA), a través de la empresa Geosistemas. También existe un sistema de banderillero satelital de la empresa Satloc que no necesita señal DGPS, pero requiere 10 minutos en forma estacionaria para autoposicionarse.

Cuadro 10.1: Adopción de las herramientas de la agricultura de precisión en Argentina

	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Monitores de rendimiento con GPS	25	75	155	270	400	420	600	850	1300
Monitores de rendimiento sin GPS	25	125	145	180	160	160	250	350	200
Monitores de rendimiento TOTAL	50	200	300	450	560	560	850	1200	1500
Dosis variable (DV) en sembradoras	1	2	3	4	5	5	7	8	20
DV en camiones fertilizadores (Terra-Gator)	2	2	2	2	6	6	6	6	7
DV en incorporadoras de urea	0	0	0	0	0	0	4	4	30
DV en espaciadoras de urea al voleo	0	0	0	0	0	0	0	10	20
DV de incorporadoras de UAN	0	0	0	0	1	2	3	3	3
DV de UAN en pulverizadoras autopropulsadas	0	0	0	0	0	0	5	9	60
Fertilización con dosis variable (DV), TOTAL	3	4	5	6	12	14	25	40	120
Banderilleros satelitales en aviones	35	60	100	160	200	230	300	450	470
Banderilleros satelitales en pulverizadoras	0	10	70	200	400	500	2000	3000	4000
Pilotos automáticos en tractores	0	0	0	0	0	0	0	3	20
Banderilleros satelitales, TOTAL	35	70	70	360	600	730	2300	3453	4490
Sensores de N en tiempo real	0	0	2	2	4	5	6	7	7

Monitoreo de rendimiento y mapeo

Las 1300 cosechadoras equipadas con monitor de rendimiento más GPS que se mencionan en el **Cuadro 10.1** tienen un potencial de cosecha de un +/- 6% del área total de los principales cultivos, por su gran capacidad y porque pertenecen a grandes productores (40%) o contratistas (60%). Este 5% del área total en Argentina se compara con un 42% del área de maíz, el 33% del área de soja, y el 14% del área de trigo en los Estados Unidos (Daberkow et al., 2002).

La **Figura 10.1** (izq.) muestra la adopción de monitores de rendimiento en el mundo en forma comparativa entre países. Como se puede observar, Argentina ocupa el segundo lugar, después de EE.UU.. Por otra parte, la **Figura 10.1** (der.) muestra el número de monitores por millón de hectáreas por país, donde la Argentina se ubica en quinto lugar, después de EE.UU., Dinamarca, Suecia y Gran Bretaña.

En Argentina, los principales fabricantes extranjeros de cosechadoras venden máquinas que ya vienen equipadas con monitor de rendimiento como equipo estándar, o que están con el cableado necesario para instalar el monitor como kit opcional. Los fabricantes argentinos de cosechadoras también venden las máquinas nuevas con el cableado listo para instalar monitores de rendimiento. De todas formas, la adopción del monitor rendimiento en Argentina requiere ciertas regulaciones específicas a las condiciones locales de cosecha. Por ejemplo y a diferencia de los Estados Unidos, en Argentina no hay heladas fuertes al momento de la cosecha que maten completamente la planta. Por lo tanto, tanto las malezas como el tallo y la paja del cultivo suelen estar más húmedos, lo que a veces suele manchar el grano con verdín, o ensuciar la placa de impacto del sensor de rendimiento.

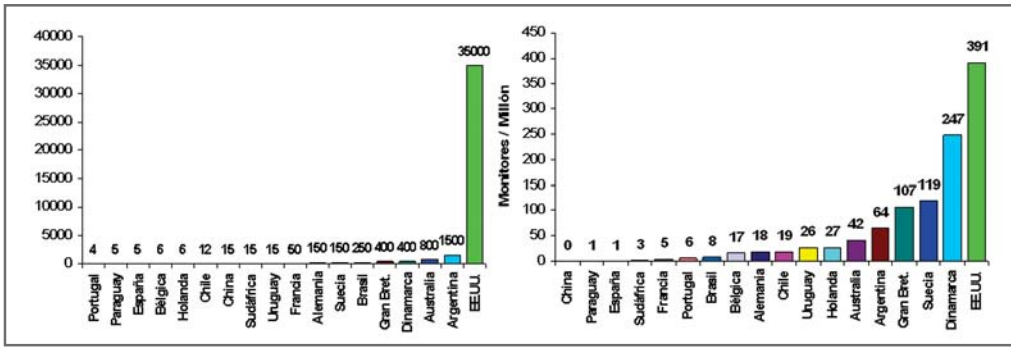

40000
35000
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0
4 5 5 6 6 12 15 15 15 50 150 150 250 400 400 800 1500 35000
Portugal Paraguay España Bélgica Holanda Chile China Sudáfrica Uruguay Francia Alemania Suecia Brasil Gran Bret. Dinamarca Australia Argentina EE.UU.
Monitores / Millón
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
0 1 1 3 5 6 8 17 18 19 26 27 42 64 107 119 247 391
China Paraguay España Sudáfrica Francia Portugal Brasil Bélgica Alemania Chile Uruguay Holanda Australia Argentina Gran Bret. Suecia Dinamarca EE.UU.

Figura 10.1: Adopción comparativa de número de monitores de rendimiento en el mundo, en cantidad (izquierda) y en densidad por millón de hectáreas (derecha).

Banderillero satelital

El sistema de guía por GPS (banderillero satelital) es la herramienta que más rápido ha sido adoptada un los últimos años, porque es fácil de usar y porque tiene beneficios inmediatos. Hay muchas marcas disponibles en el mercado argentino, incluyendo dos modelos de desarrollo local: el de la empresa Sylcomp y el modelo AirTracker de la empresa D&E. Uno de los motivos de la rápida adopción de banderilleros satelitales en Argentina es que son pocas las pulverizadoras autopropulsadas que cuentan con marcadores de espuma, sino que la mayoría continúa usando dos personas con banderas (banderilleros) en ambos extremos del lote. El uso del sistema de guía por GPS permite reducir el riesgo de intoxicación ligado a esta actividad y el costo de la mano de obra.

La novedad en el mercado argentino es el lanzamiento del sistema de piloto automático o autoguía de la empresa Trimble, introducido al país por la firma D&E en Marzo del 2004, el que ha sido probado exitosamente en tractores y pulverizadoras autopropulsadas. Por otra parte, en Marzo del 2005 también se introdujo al país el sistema de manubrio automático (EZ Steer), de la empresa Trimble, como así también en el 2006 de la empresa John Deere. Estos equipos permiten que el implemento siga una trayectoria predeterminada, sin la intervención del operario.

Muestreo intensivo de suelos

En Argentina, la limitante para realizar recomendaciones de manejo sitio-específico en base al muestreo intensivo de suelos es que sólo el 50% del área cultivable se muestrea periódicamente para analizar los niveles de nutrientes, el 25% se muestrea anualmente antes de la siembra y en menos del 1% del área cultivable se hace muestreo intensivo (García, 2003). Debido a que todavía no se han difundido masivamente las estrategias para convertir la información en recomendaciones de manejo con dosis o densidad variable, sólo fueron vendidas unas pocas sembradoras y pocas fertilizadoras con la capacidad de realizar densidad de siembra variable o dosis variable de fertilizante. Los fabricantes argentinos han incorporado a sus máquinas variadores y controladores importados desde Estados Unidos, principalmente para realizar dosis variable de nitrógeno (N).

Un proveedor de insumos agrícolas ofrece el servicio de dosis variable en el noreste de la provincia de Buenos Aires, usando camiones aplicadores equipados con sistema de dosis variable de fertilizante. Algunas compañías químicas también ofrecen el servicio de dosis variable de fertilizante en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, como así también de UAN (solución de

urea-nitrato de amonio) en la provincia de Córdoba (PASA, 2001), pero hasta ahora no se usa comercialmente en forma sitio-específica en las explotaciones agropecuarias por falta de información sobre las características de los suelos. El concesionario de una compañía noruega (Yara) ofrece un sistema sensor de nitrógeno para montar sobre tractores o pulverizadoras que está vinculado a un aplicador de fertilizante con controladores que le permiten variar la dosis de N sobre la marcha, en tiempo real. Hay siete equipos disponibles en el país.

El sensor de nitrógeno mide la biomasa y el contenido de clorofila de las plantas a medida que el vehículo pasa por el lote, usando luz infrarroja. Con esta información, una computadora calcula la cantidad de N que la planta necesita para el llenado de granos con alto contenido de proteína. A su vez, esta información es pasada al fertilizador, que varía la dosis de aplicación de N de acuerdo al nivel óptimo.

El nitrógeno es quizás el más importante de los nutrientes esenciales para las plantas, debido a las elevadas cantidades en que es demandado durante el crecimiento de los cultivos, a que habitualmente es deficitario en los suelos agrícolas y a la creciente preocupación por la preservación del ambiente. Por ello, en la búsqueda de prácticas de manejo que permitan un uso más eficiente de los insumos, aplicándolos en los lugares y en las cantidades que los cultivos los requieren, se presenta una gran oportunidad para la agricultura de precisión.

Las plantas contienen entre 1 a 5% de N y cuando este elemento se encuentra en deficiencia las hojas cambian su coloración mostrando tonos verdes menos intensos o amarillentos, llegando a necrosarse desde el ápice en condiciones de agudas deficiencias. Estos cambios de coloración modifican el patrón de reflectancia de la canopia, lo que ha servido de base para el desarrollo de diversas técnicas de monitoreo del estado de nutrición nitrogenado, con herramientas que incluyen desde elementos portables, hasta sensores remotos montados en aeronaves o satélites. Entre estas herramientas se cuenta el N-Sensor, dispositivo capaz de determinar el requerimiento de N para un cultivo a través de mediciones de la luz reflejada por la canopia y de realizar prescripciones en tiempo real con el fin de optimizar la aplicación de fertilizantes.

La bibliografía especializada sugiere la conveniencia de realizar aplicaciones de N en cultivos de maíz ya implantados y en activo crecimiento, haciendo coincidir los aumentos de disponibilidad y demanda del nutriente. Se han desarrollado métodos de diagnóstico como el de nitratos en estadio de 5-6 hojas, el que para una aplicación sitio-específica, presenta como limitante el costo y la laboriosidad de obtener las muestras a campo. Ante esto, obtener en forma remota un índice del estado de nutrición nitrogenada que permita diagnosticar deficiencias y prescribir dosis, es una alternativa promisoria que resulta de interés evaluar en sistemas reales de producción.

Ya hay productores en las provincias de Buenos Aires, Córdoba y Santa Fé que realizan dosis variable de N por topografía. Asimismo, en la actualidad, hay numerosas compañías que proveen servicios integrales de agricultura de precisión a los productores. El paquete de servicios incluye el relevamiento de suelos con GPS, mapas de elevación digital, medición de la compactación de suelo, muestreo de suelo georeferenciado, análisis de suelo, seguimiento del cultivo en forma georeferenciada, imágenes satelitales, creación de zonas de manejo de suelos, recomendaciones de fertilización, mapeo de suelos, etc.

Percepción remota

El uso de los sensores remotos en agricultura también se está difundiendo cada vez más en Argentina, motivado por cuatro razones, en orden descendiente de importancia. Primero, las imágenes satelitales son exigidas por ley (en la provincia de Buenos Aires) para obtener exenciones impositivas por emergencias agropecuarias (Testa, 2001). Segundo, algunos bancos usan las

imágenes satelitales para otorgar préstamos para la producción o para la compra de tierras. En tercer lugar, los grandes productores usan las imágenes satelitales para determinar la calidad de la tierra y el riesgo de inundación antes de comprar o alquilar tierra. Por último, los ingenieros agrónomos usan cada vez más los sensores remotos para determinar áreas de aptitud para cultivos, topografía, índices verdes, etc.

En Argentina, la recepción de información satelital (Landsat 5 y 7) se viene haciendo desde principios de 1997 por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), ubicada en la zona de Falda del Cañete, a 30 km al oeste de la ciudad de Córdoba. Las imágenes de Landsat 5 son más económicas en Argentina que en EE.UU., lo que ha permitido que muchas instituciones y compañías privadas se beneficien de esta tecnología. Las imágenes de Landsat 7 cuestan USD 200 para Argentina y USD 500 para el exterior, por cada imagen completa con una resolución de 30 x 30 m. Los productores también pueden obtener imágenes digitalizadas de sus propios campos, partiendo de 20 USD por una imagen básica hasta los USD 100 por una imagen con mapa digitalizado, área de los lotes, y un informe escrito e interpretado por los profesionales del INTA Castelar. La CONAE adquiere y distribuye imágenes de muchos satélites. Entre ellos están: Landsat 5 TM (sensor óptico de 7 bandas; 30 m de resolución espacial); Landsat 7 ETM (sensor óptico de 7 bandas; 30 m de resolución espacial; más una banda pancromática de 15 m de resolución espacial); SPOT 1 y 2 HRV (sensor óptico de 3 bandas; 20 m de resolución espacial; más una banda pancromática de 10 m de resolución espacial); NOAA AVHRR (sensor óptico de 4 bandas; 1100 m de resolución espacial); SeaWiFS (sensor óptico de 8 bandas; 1000 m de resolución espacial); EROS-II (sensor óptico pancromático; 2 m de resolución espacial); SAC-C (sensor óptico de 4 bandas; 130 m de resolución espacial; más una banda pancromática de 35 m de resolución espacial); ERS Sensor Radar; y Radarsat: Sensor Radar.

El programa de predicción de cosechas del Departamento de Clima y Agua del INTA Castelar (provincia de Buenos Aires) viene usando las técnicas de sensores remotos y de GIS desde 1991 para determinar el área de siembra de los diferentes cultivos. Esta información, combinada con modelos de simulación de cultivos (por ejemplo: CERES wheat, etc.), le ha permitido al INTA Castelar estimar la producción de toda una campaña. La importancia de esta herramienta se ha comprobado durante las inundaciones de los últimos años. Actualmente, el INTA brinda información a partir de las imágenes del satélite Landsat, que tiene un ciclo de recurrencia de dieciséis días.

Muchos productores y profesionales relacionados también usan esta información, en combinación con los mapas de suelos, para determinar la aptitud productiva de los suelos, basados en el color del suelo, acumulación de sales, drenaje, etc., antes de comprar o alquilar tierra. Algunos también usan la información para reestructurar la división de los lotes de sus campos (alambrados).

Se debe destacar que la mayor ventaja del uso de imágenes satelitales en Argentina se debe a tres razones. Primero, la falta de información cartográfica detallada. Los mapas de suelos que se disponen en algunas partes del país son en una escala de 1:50.000, y no existen los modelos de elevación digital, como los que se usan en Estados Unidos para analizar la variabilidad espacial de áreas agrícolas. Segundo, las imágenes de cámaras multiespectrales son muy caras, porque están en manos de empresas extranjeras. No obstante, el INTA Castelar adquirió recientemente una cámara multiespectral con el respectivo software y se espera que comiencen a ofrecer el servicio de imágenes multiespectrales a un costo menor que el de las compañías privadas. El tercer y último factor, determinante en el mayor uso de las imágenes satelitales, es que las fotografías aéreas en blanco y negro (pancromáticas) que se disponen están desactualizadas, porque son las mismas que se tomaron para la creación de las cartas de suelo, a fines de los años 1960 y comienzo de los años 1970. Han quedado desactualizadas porque la siembra directa ha reemplazado a la labranza convencional en gran parte de la Pampa Húmeda. Por lo tanto, las imágenes satelitales constituyen una importante fuente de información en lo que se refiere a series de imágenes en el tiempo y a información actualizada.

El INTA Manfredi realizó ensayos para mejorar las técnicas de análisis de imágenes satelitales, para detectar estrés del cultivo de maní y para correlacionarlo con la incidencia de enfermedades, especialmente para detectar la presencia de aflatoxinas. El objetivo de la investigación es diferenciar áreas de alto y de bajo riesgo de presencia de aflatoxinas, de forma tal que dichas áreas puedan ser cosechadas y almacenadas por separado.

Sistema de información geográfica (GIS)

Con respecto a los programas de computación de Sistemas de Información Geográfica (GIS, en inglés o SIG, en Castellano), FarmWorks es el más usado por los productores y por los asesores. Usando una estrategia de mercado agresiva, el representante de esta empresa en Argentina ha venido ofreciendo cursos de capacitación en el uso de este programa, como una forma de incentivar su compra y de otros productos de agricultura de precisión. Este software tiene la ventaja de que está disponible en Castellano y de que tiene un precio relativamente accesible.

La mayoría de los investigadores usan el software ArcView (un GIS de la empresa ESRI), pero su costo en Argentina es una desventaja: USD 2300 por el programa básico, comparado con USD 1250 en los Estados Unidos. La Universidad de Buenos Aires ofrece cursos regulares de entrenamiento para profesionales de diferentes disciplinas, sobre ArcView, Envi (software para el procesamiento de imágenes), sensores remotos y fotografía aérea. También hay algunos asesores que usan el software SSToolbox, un programa muy completo y especialmente diseñado para agricultura de precisión que está construido sobre la base de ArcView. Su costo es de USD 4995 + IVA para la versión completa, USD 3495 para la versión intermedia y USD 1745 para la versión básica.

El representante en Argentina del software de la empresa ESRI también ofrece cursos de capacitación, como así también imágenes de diferentes satélites, tales como Ikonos y Radarsat. El precio de las imágenes de alta definición (USD 6000) reflejan una gran diferencia con respecto a los mismos productos en Estados Unidos (USD 3000), a valores del año 2001.

Últimamente hay un creciente número de usuarios de IDRISI, un software GIS desarrollado por la Universidad de Clark, Estados Unidos. Dentro de sus principales ventajas se encuentra el bajo precio (USD 600 para su versión académica) y la amplia red de atención al cliente. IDRISI se expandió a muchas universidades de la Argentina y recientemente a otras instituciones públicas y privadas (INTA, SAGyP, etc.). Hay un centro de apoyo de IDRISI en Córdoba: El Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales (CREAN, http://www.crean.org.ar/) que es una unidad de investigaciones aplicadas perteneciente a la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Córdoba. El CREAN está integrado por investigadores, profesionales y técnicos del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y por docentes y personal administrativo de la Universidad Nacional de Córdoba. Las áreas temáticas que abarca la actividad del CREAN comprenden: a) Desarrollo y calibración de modelos de simulación y de pronósticos de rendimiento de cultivos; b) Zonificación agroecológica de cultivos de alto rendimiento, cultivos alternativos y cultivos no tradicionales, para distintas áreas agrícolas del país; c) Monitoreo y control de uso y manejo de suelos; d) Estudio de estrategias de monitoreo y control de plagas; e) Análisis de parámetros que favorezcan o aceleren los procesos de desertización; f) Realización de pronósticos agrometeorológicos a corto, mediano y largo plazo; g) Análisis digital de imágenes de sensores remotos; h) Aplicación de sistemas de información geográfica (SIG); i) Evaluación "in situ" de la pérdida de la biodiversidad y la erosión genética vegetal; j) Evaluación de germoplasma nativo, desde aspectos multidisciplinarios; k) Estudios etnobotánicos de especies nativas y exóticas de interés medicinal, agrícola y ornamental; l) Formación de recursos humanos en diversas áreas científicas y tecnológicas; m) Monitoreo de Cultivos y Pronóstico de Rendimientos; y n) Alerta Temprana de Seguridad Alimentaria.

Algunas compañías de seguro, como por ejemplo Cooperativa La Dulce, en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, también están impulsando la agricultura de precisión en Argentina. Han organizado exposiciones "Agro Informática", conjuntamente con el Instituto del Potasio y el Fósforo del Cono Sur (INPOFOS), el INTA y la Universidad de Purdue (West Lafayette, Indiana, Estados Unidos). "Agro Informática" es la versión argentina de la Conferencia "InfoAg" que se organiza cada dos años por el Instituto del Potasio y el Fósforo de Estados Unidos (PPI).

ANÁLISIS FODA DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN ARGENTINA

El análisis FODA (en inglés SWOT), es la sigla usada para referirse a una herramienta analítica que le permitirá trabajar con toda la información que posea sobre un negocio, o una tecnología innovadora, etc., para examinar sus Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas.

Este tipo de análisis representa un esfuerzo para examinar la interacción entre las características particulares de la tecnología innovadora y el entorno en el cual ésta compite. El análisis FODA tiene múltiples aplicaciones y puede ser usado por todos los niveles y en diferentes unidades de análisis tales como producto, mercado, producto-mercado, línea de productos, corporación, empresa, división, unidad estratégica de negocios, etc. Muchas de las conclusiones obtenidas como resultado del análisis FODA, podrán ser de gran utilidad para considerar la incorporación de una o varias de las herramientas de la agricultura de precisión a sus prácticas de producción.

El anális FODA debe enfocarse solamente hacia los factores claves para el éxito. Debe resaltar las fortalezas y las debilidades diferenciales internas al compararlo de manera objetiva y realista con las tecnologías con las que compite y con las oportunidades y amenazas claves del entorno.

Lo anterior significa que el análisis FODA consta de dos partes: una interna y otra externa. La parte interna tiene que ver con las fortalezas y las debilidades, aspectos sobre los cuales el productor o asesor tiene algún grado de control. La parte externa mira las oportunidades que ofrece el mercado y las amenazas que debe enfrentar. Aquí, tanto productores como asesores tienen que desarrollar toda su capacidad y habilidad para aprovechar esas oportunidades y para minimizar o anular esas amenazas, circunstancias sobre las cuales se tiene poco o ningún control directo.

Factores que favorecen la adopción de la agricultura de precisión en Argentina (Fortalezas).

Hay varios factores que sugieren que el monitoreo de rendimiento es una de las herramientas de la agricultura de precisión que se va a adoptar más rápidamente que otras. Esto se debe a:

A. Productores que trabajan grandes extensiones de tierra, con una relación relativamente alta capital / empleado.

Norton y Swinton (2001) sostienen la hipótesis de que las tecnologías de agricultura de precisión van a ser adoptadas primero en las regiones del mundo con grandes extensiones agrícolas y con alta inversión de capital por hectárea. Usando estadísticas de la FAO, muestran que cuando se trata a nivel país, solamente Estados Unidos, Canadá y Australia reúnen dichas condiciones, aunque también indican que algunos países en desarrollo, con minifundios en zonas marginales que bajan el promedio nacional, también tienen dadas las condiciones necesarias para el uso rentable de las tecnologías de la agricultura de precisión en el futuro cercano (ej., la Pampa Húmeda Argentina).

Norton y Swinton (2001) también sostienen la hipótesis de que los países más rápidos en adoptar las tecnologías de agricultura de precisión son los países en donde la tierra agrícola y el capital abundan. Basándose en la abundancia relativa de tierra y capital con respecto a la mano de obra, estos autores sugieren que los mejores candidatos para la adopción rentable son Canadá, Estados Unidos y Australia, seguidos por Europa Occidental y Argentina. Argentina tiene una relación tierra / mano de obra más alta que Europa Oriental, Brasil, Asia y el resto de Latinoamérica. Sin embargo, la adopción en Argentina varía sustancialmente de la adopción en Estados Unidos o Canadá por las diferentes condiciones agronómicas y económicas.

B. Alto nivel de educación de grandes productores y de los asesores rurales.

La tasa de alfabetismo en Argentina es del 96,2% y la mayor parte de los operarios de maquinaria agrícola pueden leer y escribir. Casi todos los productores rurales de la Pampa Húmeda tienen el secundario completo y algunos de estos productores tienen títulos universitarios. Algunos de los Ingenieros Agrónomos que son asesores rurales de estos productores tienen títulos de post-grado y están en contacto con la tecnología de los países más desarrollados.

C. Tecnología disponible de Norteamérica y Europa y desarrollos locales post-devaluación.

Gracias a las similaridades que existen entre la producción agrícola del cinturón maicero de los Estados Unidos y la Pampa Húmeda, la mayor parte de la tecnología en maquinaria agrícola, agroquímicos y biotecnología que se dispone en los Estados Unidos puede ser importada con muy pocas modificaciones a la Argentina, excepto para el caso de las sembradoras de siembra directa, donde existe la necesidad de desarrollos locales o adaptaciones de las máquinas importadas, por las diferentes condiciones de siembra y por el doble cultivo soja / trigo.

Aproximadamente, mil productores agropecuarios, Ingenieros Agrónomos y fabricantes argentinos visitan el Farm Progress Show de los Estados Unidos cada año, una exposición similar a nuestra Expo-CHACRA o Feriagro, para recolectar las últimas novedades en el desarrollo de tecnología. Por ejemplo, el INTA Manfredi ha organizado viajes de capacitación técnica durante los últimos quince años, visitando fábricas de equipos agrícolas, universidades y el Farm Progress Show. No obstante, la maquinaria agrícola y el equipamiento importado en general son más caros en Argentina que en el exterior debido a los costos de transporte y a los aranceles. Además, la devaluación del peso argentino casi triplicó el costo de los artículos importados.

D. Necesidad de los grandes productores de contar con mayor información.

A medida que el tamaño medio de las explotaciones aumenta en Argentina (en la región pampeana aumentó el 35,6% entre 1988 y 2002), la menor cantidad de productores a cargo de las explotaciones agropecuarias (el número de explotaciones agropecuarias en la región pampeana cayó el 30,5% entre 1988 y 2002) que quieren seguir expandiendo sus operaciones necesitan más y mejor información para alquilar o comprar tierra. Al mismo tiempo, los grandes productores necesitan información sobre suelos y rendimientos para realizar planes de fertilización y de manejo de las explotaciones.

Los mapas de rendimiento, los registros de trabajos realizados a campo y otros datos de precisión, son comparativamente más valiosos en Argentina que en Estados Unidos porque, por lo general, el productor argentino no observa las condiciones del cultivo o el rendimiento desde el tractor o la cosechadora, ya que ese trabajo lo hace un operario. En los Estados Unidos, donde son los productores quienes operan sus propios equipos, los mapas de rendimiento son una ayuda para cuantificar la variabilidad que los productores ya conocen de antemano. En Argentina, los mapas suelen revelar una variabilidad que los productores no habían tenido la posibilidad de observar directamente. Además, los mapas de rendimiento y otros datos de precisión proporcionan una excelente herramienta para el control de calidad de los trabajos a campo de los operarios o de los contratistas.

E. Facilidad de compartir datos para analizar problemas y buscar soluciones.

El uso de los datos del monitor de rendimiento y de otros datos georeferenciados se facilitan en Argentina porque hay menor necesidad de agrupar datos de varios campos para obtener conclusiones, mientras que en los Estados Unidos, los productores necesitan hacer un pool de datos para sacarle todo el jugo a esta tecnología. La mayoría de los productores del cinturón maicero norteamericano no son lo suficientemente grandes como para tener todo el rango de condiciones necesarias para comenzar a identificar tendencias sin necesidad de realizar ensayos experimentales. Mientras que en muchas de las grandes explotaciones de Argentina, se reduce la necesidad de hacer un pool de datos. Muchos productores siembran más de 5.000 hectáreas. Dependiendo de la variabilidad natural e inducida, estas 5.000 hectáreas pueden brindar suficiente información como para comenzar a identificar tendencias sin haber hecho ensayos experimentales.

Aún si fuera necesario hacer el pool de datos, es más fácil hacerlo en Argentina de lo que ha sido en los Estados Unidos, porque la agricultura argentina tiene una larga tradición en el compartir datos de producción. Por ejemplo, los grupos de Consorcios Regionales de Experimentación Agropecuaria (CREA) se reúnen periódicamente para compartir información agronómica y económica de sus explotaciones. En parte, esto ocurre porque los productores argentinos recién han comenzado a competir por el alquiler de la tierra. En sus reuniones, por lo general la preocupación es en mejorar el manejo de las hectáreas de sus explotaciones. En los Estados Unidos, una de las razones de la reticencia en compartir datos es que los productores no quieren que los datos de rendimiento y otra información sensible vaya a parar a las manos de aquellos futuros competidores por el alquiler de la tierra.

Los monitores de rendimiento en Argentina se usan sobre un área mucho mayor que en los Estados Unidos. Debido a las largas campañas de cosecha y al uso generalizado de contratistas, las cosechadoras grandes generalmente cosechan unas 3.500 a 5.000 hectáreas/año, más del doble que el área cosechada por cada máquina en los Estados Unidos. Distribuyendo el costo del monitor y del GPS sobre un área mayor, el costo por hectárea es menor en Argentina que en los Estados Unidos.

Factores que desfavorecen la adopción de la agricultura de precisión en Argentina (Debilidades).

Para la adopción de la agricultura de precisión en Argentina, hay por lo menos cuatro diferencias clave con países desarrollados:

A. Mayor costo de la inversión en hardware y software por la devaluación y por la falta de crédito.

Argentina entró en default de su deuda externa en enero de 2002. Desde entonces, el crédito comercial y para la producción, prácticamente, desapareció del mercado. En el 2002, el peso se depreció en un 68% y a comienzos del 2004 todavía estaba depreciado en un 49% con respecto al dólar en términos de poder de compra (Economist, 2002, 2004). Todos los insumos de la producción se pagan en efectivo o en soja. Además del aumento de costos por la devaluación del peso, el costo de la mayoría de las herramientas de la agricultura de precisión es en promedio un 40% superior que en los Estados Unidos, por los aranceles, impuestos y transporte.

B. Mayor riesgo de producción por retenciones, ausencia de subsidios, poca difusión del seguro de cosecha, falta de infraestructura de comercialización y transporte, inundaciones, etc.

En la Argentina no hay programas para estabilizar el precio de los granos o el ingreso de los productores. La falta de crédito, el mayor costo de la tecnología y el mayor riesgo de producción desalienta la inversión en nuevas tecnologías, incluyendo la agricultura de precisión. El acceso al seguro es limitado: la Secretaría de Agricultura (SAGPyA) indica que sólo el 9% de la producción

agrícola está asegurada, comparado con el 42% en los Estados Unidos, 52% en Canadá y 30% en España. Por ejemplo, en la campaña de cosecha 2000/2001, las compañías de seguro aseguraron cultivos por un valor de 52 millones de dólares, lo que se considera bajo. Esto ocurre porque el seguro es caro y porque sólo las grandes explotaciones lo pueden afrontar. Hay poca diversificación en la agricultura. La baja inversión pública en investigación, infraestructura, transporte y drenaje de tierras inundadas no ayuda a disminuir los riesgos de producción. La mayoría de las rutas pavimentadas son de dos carriles en una sola faja asfáltica y el acceso a los establecimientos es en su mayoría de tierra, lo que complica la salida del grano de los campos, especialmente en épocas de lluvia. Grandes áreas de la Pampa Húmeda tienen serios problema de drenaje e inundaciones periódicas.

C. Menor variabilidad inducida de suelos por una historia de agricultura más reciente que en el hemisferio norte y por el poco uso de fertilizantes o enmiendas.

La mayor parte de la Pampa Húmeda se caracteriza por grandes lotes con una historia de agricultura mucho menor que en Europa o Norteamérica, los que se han convertido de lotes en rotación con pasturas a lotes con agricultura continua, por lo que la variabilidad inducida por el hombre es menor que en otros países con una agricultura más intensiva. Por ejemplo, hay menos alambrados, caminos o lotes que hayan sido removidos recientemente. El uso del fertilizante es relativamente nuevo en Argentina, por lo que no existió la posibilidad de crear variabilidad por mal funcionamiento del fertilizador. La variabilidad natural de suelos en Argentina es importante, aún en los llanos, aparentemente homogéneos de la Pampa Húmeda, donde ciertas características tales como salinidad y pequeñas diferencias en la topografía pueden tener una gran influencia sobre los rendimientos.

En la actualidad muchos productores usan poco o nada de fertilizante. Aún en los establecimientos bien manejados y con alta inversión de capital, se usan dosis que son muy bajas: 35-65 kg por hectárea de N en maíz y 20-45 kg por hectárea de P_2O_5 en suelos de 1-3% de materia orgánica y resultados de análisis Bray de fósforo (P) entre 6-15 partes por millón (ppm). Los valores normales de análisis Bray P deberían ser entre 20-25 ppm (García, 2001). De acuerdo a García (2001), los campos pierden entre 1,7 y 4 ppm cada 3 años. Esto no brinda muchas oportunidades de obtener beneficios por el ahorro de la disminución en la cantidad de fertilizante aplicada. El consumo de fertilizantes en Argentina aumentó notablemente en la década del '90, pasando de 325.000 toneladas en 1991 a más de 1.600.000 toneladas en 1999. Sin embargo, el balance de nutrientes en los suelos en la Pampa Húmeda es negativo. Estimaciones recientes hablan de 25-30% reposición de N, 45-50% de P, 7-10% de azufre (S) y menos del 1% de potasio (K) (García, 2003).

D. Uso generalizado de contratistas, lo que puede dificultar la cosecha de datos de calidad.

En Argentina, el gerenciamiento de las explotaciones agropecuarias y la operación de la maquinaria suelen constituir dos empresas distintas. Los contratistas realizan la mayor parte de las operaciones a campo, incluyendo la siembra. Muchos productores no son propietarios de maquinaria agrícola. La cosecha se hace por equipos de cosecha que cobran entre el 8 y 9% de la cosecha. Este tipo de cosecha hecha por contratistas representa un problema para el monitoreo de rendimiento, dado que los operarios de la cosechadora son empleados de un empresario de equipos de cosecha, por lo general tienen educación primaria solamente y nunca han usado una computadora. Están motivados a cosechar la mayor cantidad de grano posible, lo más rápido posible y no están necesariamente motivados para recolectar datos de rendimiento de calidad. Algunos contratistas ven el monitoreo de rendimiento como un servicio extra que pueden brindar a sus clientes, como una forma de diferenciarse. Aunque no cobren extra por el monitoreo de rendimiento, crea una relación de largo plazo con sus clientes. A los contratistas de cosecha también les gusta tener una estimación de la cantidad cosechada para saber cuánto van a cobrar, independientemente de lo que diga la balanza del campo o del acopio. Por lo tanto, hay varios incentivos que promueven la adopción del monitor de rendimiento entre los productores y

contratistas. El manejo de la información de rendimiento se va a transformar en un desafío, tanto para contratistas como para productores, cuando llegue el momento en que haya que transformar esa información en conocimiento y que ese conocimiento se transforme en decisiones de manejo. En este sentido, el proyecto de agricultura de precisión del INTA Manfredi brinda cursos de capacitación para operarios y productores para poder usar esa información con criterio agronómico y económico para la toma de decisiones.

Oportunidades

El principal desafío para una mayor difusión y adopción de la agricultura de precisión en Argentina: Entrenar a los agrónomos y a los productores a recolectar información útil para un análisis sitio-específico. Ejemplo de esto puede ser ensayos a campo en los que se pueda establecer una relación entre las características de los ambientes dentro del lote y los rendimientos obtenidos.

Las tecnologías de agricultura sitio-específica hacen posible la aplicación localizada de fertilizantes y otros insumos. Sin embargo, existe una brecha de información entre el mapa de características del suelo y la aplicación de insumos en forma sitio-específica. Esta brecha de información son las recomendaciones de fertilización que se hacen de acuerdo al potencial de rendimiento que se quiere lograr y a lo que se dispone en el suelo. Estas recomendaciones, que indican una cantidad determinada de fertilizante a aplicar por cada unidad de rendimiento que se quiera alcanzar (método del balance), se basan en investigaciones y ensayos a larga escala realizados para una zona amplia, cuyos resultados han sido promediados. Por definición, las recomendaciones para cada región de cultivo omiten las características de cada localidad o sitio, lo que debilita su precisión para ser usadas como guía en la aplicación sitio-específica de insumos (Swinton et al., 2001).

Existen pocos recursos para la investigación, para poder adaptar las tecnologías de la agricultura de precisión a las condiciones de Argentina. Ni el INTA ni las universidades disponen del presupuesto necesario para hacer investigación de alto impacto en agricultura de precisión. Toda la investigación que se hizo hasta el momento fue posible gracias a la colaboración de compañías comerciales y de productores de punta que se ofrecen voluntariamente para hacer ensayos a campo.

Desafíos

A. Capacitar a los operarios de cosechadoras y contratistas a recoger datos georeferenciados.

En respuesta a este desafío, el INTA Manfredi ofrece cursos de capacitación para operarios, esperando hacer llegar el mensaje de que las cosechadoras también cosechan datos, además de granos, y que esos datos son valiosos. El mayor desafío es crear un precio incentivo para que el sistema funcione como recolector de datos.

B. Formar a los Ingenieros Agrónomos y a los Economistas Agrarios para que realicen análisis de rentabilidad en el espacio y en el tiempo.

Los monitores de rendimiento están en el mercado desde hace casi diez años, pero ha sido muy difícil de establecer la relación entre el rendimiento y las condiciones del cultivo (ej.: análisis de suelos, aplicación de insumos, topografía, etc.). Los análisis de rentabilidad realizados hasta el momento en el país indican que el manejo sitio-específico es rentable, pero se necesita mayor investigación, especialmente en el campo de la dosis variable.

C. Interpretación de datos. Esto es un desafío siempre que se usa la agricultura de precisión y no se conocen las causas de la variabilidad.

En Argentina, éste es un desafío para los productores que no van arriba del tractor o de la cosechadora, para ver y entender la variabilidad presente en sus lotes. Otro desafío es la adaptación del diseño experimental de ensayos a campo. Los métodos de ensayos a campo desarrollados en los Estados Unidos no se pueden transferir directamente a la Argentina. Por ejemplo, en los Estados Unidos los ensayos de sembradoras divididas funcionan bien en maíz porque muchos productores tienen cabezales maiceros que tienen exactamente la mitad del ancho de sus sembradoras, lo que no ocurre en Argentina. Por lo tanto, es necesario desarrollar diseños de ensayos a campo que respondan a las preguntas de los productores.

D. Usar datos de bajo costo, tales como mapas de rendimiento, mapas de elevación digital, imágenes satelitales, fotografías aéreas y en el futuro, sensores remotos y sensores de suelo.

La adaptación de la tecnología de dosis variable a las condiciones de Argentina requiere formas de usar datos de bajo costo en lugar de muestreo intensivo de suelos en cuadrículas. Estos datos de bajo costo pueden ser mapas de rendimiento, mapas topográficos, imágenes satelitales, fotografías aéreas y eventualmente, sensores remotos y sensores de suelo.

E. Desarrollar redes locales de investigación y experimentación adaptativa, ya que la agronomía y la economía de la agricultura de precisión son sitio-específicas.

Este es el desafío más importante para la agricultura de precisión en Argentina. La tecnología desarrollada en Norteamérica o en otros lados tiene que ser adaptada a las condiciones locales. Hay muchas tecnologías que se pueden tomar prestadas de otros países, pero en el caso de la agricultura de precisión, hay que desarrollar soluciones locales, porque la agronomía y la economía de la agricultura de precisión son específicas de cada sitio. Para que la agricultura de precisión alcance su máximo potencial en Argentina se necesita una combinación entre el esfuerzo de la actividad pública y la actividad privada.

PRONÓSTICO

- Rápida adopción del monitor de rendimiento por parte de productores y contratistas.

  La tecnología más adoptada en el mundo es el monitor de rendimiento. Los monitores brindan información sobre algo en lo que los productores están apasionadamente interesados: el rendimiento de los cultivos. Desde que se probaron las primeras unidades en 1996, el uso de monitores de rendimiento creció rápidamente. La mayoría de las cosechadoras nuevas ya vienen con un monitor de rendimiento instalado o como opcional, lo que proporciona a los grandes productores (que son propietarios de un 40% de las grandes cosechadoras) una forma directa de medir la productividad de los lotes que trabajan. Por otro lado, los contratistas (que son propietarios de un 60% de las grandes cosechadoras) ven el monitoreo de rendimiento como una forma de aumentar la lealtad de sus clientes.

- Rápida adopción del banderillero satelital en aviones y pulverizadoras autopropulsadas, por parte de contratistas.

  Los banderilleros satelitales constituyen la tecnología con mayor tasa de crecimiento, porque son fáciles de usar y porque sus beneficios son inmediatos.

- Lenta pero sostenida adopción de la dosis variable, en la medida en que se identifiquen

los factores limitantes de rendimiento y se prescriban recomendaciones adecuadas para cada zona de manejo.

El uso de la dosis variable en Argentina va a crecer lentamente por el alto costo del muestreo de suelos, la poca variabilidad inducida de suelos y las bajas dosis de fertilizante que se aplican en la actualidad. El costo de un análisis de suelo simple es de USD 10 y de USD 20 por un análisis completo, lo que se compara con USD 6 por análisis completo en los Estados Unidos, haciendo imposible el muestreo intensivo de suelos por cuadrículas. La diferencia de precio se debe a que en los Estados Unidos hay laboratorios que analizan un gran volumen de muestras y que justifican la compra de equipos que hacen análisis de inductively coupled plasma-membrane (ICP), que tiene un costo de USD 125.000 en los Estados Unidos, como así también un alto costo de mantenimiento debido al alto costo de los insumos y a la necesidad de contar con técnicos de laboratorio especializados. Los laboratorios que usan el sistema de análisis ICP tienen economías de escala porque reciben muestras de todo el país y a veces de todo el mundo, y porque además de analizar suelos, pueden usar este equipo para al análisis de aguas, contaminantes en el aire, etc. En Argentina (y en Australia también), el volumen de muestras es bajo, por lo que se usan métodos manuales de análisis de laboratorio, los que son más caros.

En síntesis, los desafíos más importantes para la agricultura de precisión en Argentina incluyen;

- Capacitar a los operarios de cosechadoras para recolectar información de calidad;
- Entrenar a los profesionales del sector para que realicen análisis de rentabilidad y para que interpreten los datos.
- Ayudar a los productores que no conducen maquinaria a que entiendan la variabilidad de sus lotes.
- Realizar ensayos a campo de productores de acuerdo a la necesidad de los productores y a la maquinaria agrícola que se disponga.

La dosis variable en Argentina se va a poder adoptar a partir del uso de información de bajo costo, en lugar del muestreo intensivo por cuadrículas que se hace en Estados Unidos. Estos datos de bajo costo incluyen mapas de rendimiento, mapas topográficos, imágenes satelitales, fotografías aéreas y eventualmente sensores remotos y de suelo.

El desafío más importante consiste en crear una red de investigación en agricultura de precisión.

REFERENCIAS

Daberkow, S.; Fernandez-Cornejo, J. y Padgitt, M. 2002. Precision Agriculture Technology Diffusion: Current Status and Future Prospects. Presented at the 6th International Conference on Precision Agriculture, Minneapolis, MN, (USA) July 14-17, 2002. 15 pp.

Economist. 2002, 2004. Big Mac Index. Dec 16th 2004. http://www.economist.com/displaystory.cfm?story_id=3503641 (Acceso 6 Enero, 2005)

García, F. 2001. Phosphorus balance in the Argentinean Pampas. Instituto de la Potasa y el Fósforo (INPOFOS). http://www.ppi-far.org/ppiweb/ltams.nsf (Acceso 3 Enero, 2005)

García, F. 2003. Fertilización. Una herramienta decisiva para mejorar los rendimientos. Suplemento: El Campo de La Nación. 28 de noviembre de 2003. http://www.lanacion.com.ar/suples/campo/0348/db_549581.asp?origen=premium

Norton, G.W. y Swinton, S.M. 2001. Precision Agriculture: Global Prospects and Environmental Implications. Forthcoming in G.H. Peters and P. Pingali, eds. Tomorrow's Agriculture: Incentives, Institutions, Infrastructure and Innovations: Proceedings of the 24th International Conference of Agricultural Economists, 2000. London: Ashgate.

PASA Petrosur. 2004. Comunicación personal. Email: "Jorge Bassi" jbassi@pecom.com.ar

Reca, L. y Parellada, G. 2001. El sector agropecuario argentino. Editorial FAUBA, Buenos Aires. ISBN 950-29-0640-3, 150 p.

SAGPyA – Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación. 2001. Estadísticas de producción, series históricas. http://www.sagpya.mecon.gov.ar/agricu/agricultura.htm

Swinton, S.; Bongiovanni, R.; Lowenberg-DeBoer, J. y Bullock, D. 2001. Assesing the value of Precision Agriculture Data: On-Farm Nitrogen Response in Argentina. Prepared for the AAEA Spatial Analysis Learning Workshop, August 4, 2001. American Agricultural Economists Association Annual Meeting, Chicago, Illinois, August 4-8, 2001.

Testa, A. 2001. "Inundaciones: Utilizarán imágenes satelitales. Lo dispuso el gobierno bonaerense mediante un decreto". Suplemento: El Campo de La Nación. www.lanacion.com.ar/suples/campo/0116/supl.asp?pag=P03.HTM&a=prem. (Acceso 21 de Abril, 2001)

ENTREVISTA

Javier Amuchástegui

Empresa TecnoCampo

Montecristo, Córdoba, Argentina

Javier Amuchástegui es uno de los dos hermanos propietarios de TecnoCampo, una empresa de servicios agropecuarios y de agricultura de precisión, que a su vez, siembra unas 12 mil hectáreas propias o alquiladas, un 25% de maíz, un 60% de soja de primera y un 15% de trigo/soja de segunda. Obtienen mapas de rendimiento del 80% de la superficie cosechada, y realizan dosis variable sólo en algunos lotes específicos (donde hay variabilidad manifiesta). Esta empresa, que se encuentra en pleno crecimiento, está ubicada en Montecristo, 24 km al este de la ciudad de Córdoba, Argentina.

"Entendiendo a la AP como la forma de empezar a manejar la información de manera distinta a la que se manejaba antes, que era por lotes o por promedios, de forma general y sin datos ciertos, la AP es de tremenda utilidad, porque con la agricultura tradicional se trabajaba a ciegas, mientras que con AP se trabaja con una radiografía permanente de los lotes, de las prácticas que se están haciendo. Uno puede analizar la información las veces que sea necesario, de diferentes perspectivas y combinando la información entre años. Da muchas herramientas con las que uno puede ir afinando el manejo agronómico. Permite realizar prácticas sencillas que no necesariamente requieren mucha tecnología ni herramientas especializadas, ni tecnología de dosis variable. Simplemente multiplica la capacidad de avanzar en el ajuste, en la validación de tecnologías, de probar distintas prácticas de manejo, cambiar las variables de manejo, lo que permite un rápido avance de las nuevas prácticas y una optimización en el uso de las prácticas habituales".

"No hay ninguna duda que entendida así, la rentabilidad de la AP es un hecho. Distinto quizá sea el caso de un productor que conoce el campo como la palma de su mano, conoce la variabilidad de sus lotes, y es acotada la posibilidad de variar las prácticas que realiza habitualmente".

"En nuestro caso, que somos productores contratistas, porque alquilamos la mayor parte de la superficie que trabajamos, y tenemos que tercerizar muchos de los servicios, como la siembra, pulverización o cosecha, es muy difícil el manejo de la información, es muy difícil hacer un seguimiento detallado de cada lote. La información generada por la AP es indispensable para la gestión y la optimización de la producción. El mapeo de rendimiento es una herramienta fundamental para el control de gestión, que desde que la vimos en el año 1996, la adoptamos inmediatamente y nos ha dado muchísima utilidad y satisfacción. Al principio nos costó trabajo adaptar los monitores a las máquinas locales y a las condiciones de cosecha locales, pero luego de un trabajo con el INTA y con los fabricantes estadounidenses que desarrollaron los equipos, se logró adaptar mucho mejor y se erradicó el concepto de que el monitor era una balanza y se impuso la idea de que es una herramienta agronómica. Hoy en día, estamos viendo una adopción masiva del monitor de rendimiento. Es como si el mercado ahora estuviera maduro y que estuviera valorando todos los beneficios que brinda un monitor. Años atrás, los únicos que usaban el monitor de rendimiento eran los pioneros. Hoy se está viendo un interés y una adopción mayor, junto con

un mejor manejo de los monitores, de los programas, y de la información generada. Hoy en día, el monitor forma parte del léxico corriente de todos los productores".

"2da. Etapa: El estado en el que nos encontramos los productores más avanzados en la AP es avanzar no sólo en el uso de monitores para realizar y adoptar nuevas prácticas agronómicas y evaluar la gestión, sino en hacer un manejo agronómico mucho más eficaz, teniendo en cuenta la variabilidad dentro los lotes, es decir entrar al manejo sitio-específico, adoptando la tecnología de dosis variable. Eso es lo que en este momento estamos evaluando. Pasamos por una etapa en la que la tecnología era carísima, poco práctica, con equipos muy complicados para hacerlos funcionar. A su vez, estaba en duda la validez de la respuesta agronómica".

"Hoy, la situación ha cambiado: la tecnología es mucho más accesible, hay mayor disponibilidad de equipos cuyo uso es más amigable, y por otro lado, se ha evolucionado mucho en el conocimiento agronómico, gracias a años de feedback por el uso de estas herramientas de la AP. Con los mapas de rendimiento se plantearon hipótesis, se hicieron ensayos y se evaluaron, y ahora hay muchos productores que están trabajando en zonas donde hay una respuesta muy directa, con densidad variable, con fertilización variable, con manejo de distintas variedades de soja en distintos sitios, etc. La clave es identificar la variabilidad y determinar si esa variabilidad es manejable por zonas, haciendo una evaluación agronómica y económica de la respuesta. Cuando se habla de la adopción por parte de productores, la evaluación económica es indispensable. En ese sentido, la respuesta va a ser variable de acuerdo a la zona, a los cultivos y al tipo de tecnología que se esté aplicando. Sin lugar a dudas, las herramientas están: Hoy la pelota está más en la cancha agronómica, que en la tecnológica, ya que hay disponibilidad de equipos, software, etc."

"A las empresas privadas nos faltan las herramientas de las que disponen las Universidades o los institutos de investigación como el INTA y creo que si trabajamos en equipo siempre el resultado va a ser mejor. Se suele hablar de una supuesta contraposición entre las empresas privadas y el INTA o la Universidades que hacen investigación, las empresas dicen que la academia hace cosas que a las empresas no les sirve y la academia critica a las empresas por no cumplir con los requisitos fundamentales, por violar las normas básicas de la estadística. Yo no creo que haya una contraposición, sino que la solución es que los investigadores propongan ensayos en conjunto, con una hipótesis sobre lo que se quiere hacer, diseñar un experimento que se pueda hacer en la práctica comercial, buscando una solución de compromiso entre la práctica y la ciencia, dando una mano para analizar los resultados".

10.2. AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN BOLIVIA

Juan Carlos Mejía
CIAT, Santa Cruz-Bolivia
jcmejia@ciatbo.org

INTRODUCCIÓN

La agricultura de precisión en Bolivia está orientada a cultivos extensivos y es por eso, que la mayoría de estas tecnologías están siendo utilizadas en el departamento de Santa Cruz, porque es ahí donde se realiza una agricultura mecanizada e intensiva, condiciones ideales para poder hacer trabajos en este campo.

A nivel general se puede mencionar que la agricultura de precisión se inició a partir del 2002. En la actualidad, existen diferentes casas comerciales que están difundiendo el uso de herramientas y equipos de agricultura de precisión para optimizar los procesos de producción en campo. Sin embargo, la difusión está siendo lenta, para lo cual es necesaria la participación de organizaciones públicas y privadas para fomentar el uso de estas tecnologías que están orientadas a lograr una mejor productividad.

Este capítulo menciona las principales tecnologías de agricultura de precisión que se están utilizando en Bolivia y además las dificultades con las que se está tropezando para lograr una mejor difusión de estas tecnologías innovadoras en Santa Cruz, Bolivia.

ADOPCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN BOLIVIA

Actualmente, las herramientas de agricultura de precisión que están siendo difundidas son el uso de banderilleros satelitales tanto aéreos como terrestres, navegadores satelitales, sistemas de gerenciamiento georeferenciado (SIG), controladores de caudal para pulverizadoras de tiro, monitores de siembra, monitores de rendimiento, percepción remota, niveladores láser y estaciones meteorológicas automáticas. Estas tecnologías fueron introducidas por diferentes casas comerciales y de acuerdo a un sondeo realizado. En el **Cuadro 10.2** se presenta la disponibilidad y adopción de las mismas en Santa Cruz, Bolivia.

Cuadro 10.2: Adopción de las herramientas de agricultura de precisión en Santa Cruz, Bolivia.

Herramienta/tecnología	Año de introducción	Número de usuarios, a Diciembre de 2005
Banderilleros satelitales aéreos E-dif	2003	8
Banderilleros satelitales terrestres	2002	80
Navegadores satelitales con GPS	2003	100
Sistemas de gerenciamiento georeferenciado	2004	15
Monitores de rendimiento con GPS	2004	7
Estaciones meteorológicas automáticas	2002	88

Uso de banderilleros satelitales

Uno de los primeros equipos en adoptarse fueron los banderilleros satelitales aéreos con corrección E-dif, debido a que las empresas que prestan servicios de aplicación aérea consideraban que existían pérdidas debido a la sobre aplicación y a la poca efectividad que se tenía para lograr aplicaciones uniformes en los campos agrícolas. En la actualidad, se puede mencionar que la mayoría, por no decir todas, las empresas agrícolas de aplicación aérea utilizan banderilleros satelitales. Sin embargo, la situación con las aplicaciones terrestres es diferente, debido a que son pocos los productores que ven a los banderilleros satelitales como una opción de hacer una aplicación eficiente de agroquímicos. Por el contrario, y al igual que las otras tecnologías relacionadas con agricultura de precisión, son erróneamente consideradas como un gasto en vez de una inversión.

Navegadores satelitales y mapeadores

El uso de navegadores satelitales (GPS) y mapeadores está dirigido a la delimitación de parcelas y/o lotes dentro una propiedad agrícola y a la cuantificación de áreas en tablones y/o áreas específicas, como así también para el trazado de caminos y/o trayectorias. El uso es limitado a productores de punta y asesores Ingenieros Agrónomos, a pesar de tener ventajas en la utilización de mapas digitales con la información de finca.

Sistemas de información geográfica (SIG)

Son diversos los programas SIG o software de "Sistema de gerenciamiento agrícola georeferenciado" que están siendo comercializados en Santa Cruz con el propósito de hacer más efectiva la toma de decisiones en campo. Los programas que están en el mercado son: AG Field, que recolecta y almacena datos de finca y genera información georeferenciada en relación a áreas con incidencia de plagas y productividad agrícola; y AG Drop, específico para la toma de decisiones sobre pulverización y monitoreo de aplicaciones de agroquímicos. Asimismo Pythagoras es otro de los programas SIG que se está introduciendo en el mercado y está orientado a realizar mapeos de rendimiento, incluyendo cálculos de área y también información relacionadas a implementación de sistemas de riego. En la mayoría de los casos, la adopción de estas tecnologías está siendo lenta a pesar de las ventajas que se tiene al tener un apoyo gerencial automatizado a nivel de campo.

Monitores de rendimiento

La adopción de monitores de rendimiento es casi nula a pesar de que las cosechadoras recientes tienen el componente para incorporar los mismos. En el caso de las nuevas cosechadoras ya traen incorporado el equipo para los monitores de cosecha. Actualmente, las que se encuentran en el mercado son las cosechadoras Massey Ferguson, de las cuales sólo hay siete trabajando con GPS sin corrección diferencial. Para que la adopción de esta tecnología sea mayor, es recomendable realizar un trabajo conjunto entre centros de investigación y casas comerciales, debido a que los mapas de rendimiento requieren de mayor información para poder ser interpretados adecuadamente. En este sentido, es conveniente proveer a los productores información sobre mapas de rendimiento de lotes que ya tienen un historial de manejo, además de otros mapas temáticos de la parcela, para poder tener un mejor entendimiento sobre las diferencias de rendimiento dentro una misma parcela.

Percepción remota

Dentro el campo agrícola son pocas las empresas que están ofreciendo servicios con fotografías aéreas e imágenes satelitales enfocados a historial de la finca, monitoreo de cultivos, agrimensura satelital, mosaicos de mapas y planos topográficos. A nivel general, una de las empresas que provee estos servicios es ISATEL. En la mayoría de los casos, se utilizan imágenes Quickbird a una resolución de 0.65 m; landsat 5 y 7 a una resolución de 15-30; y C-Bers II a una resolución de 20 m. Estos trabajos y servicios están siendo utilizados en su mayoría por productores grandes en zonas sojeras del departamento de Santa Cruz.

Estaciones meteorológicas automáticas

Considerando la poca disponibilidad de información meteorológica y con el propósito de tener información climática a tiempo real para apoyar la toma de decisiones en finca, se está incrementando la difusión y compra de estaciones meteorológicas automáticas. Estas estaciones proveen amplia información climática en relación a los parámetros de: radiación solar, velocidad y dirección del viento, punto de rocío, sensación térmica, precipitación y temperatura, entre otros. Sin embargo, en la mayoría de los casos el uso de estas estaciones están siendo sólo para considerar precipitación y temperatura, por lo cual es necesario una mayor capacitación en la recolección, uso y aplicación de los demás parámetros climáticos que apoyen a la toma de decisiones para una mejor producción agrícola, como es el sensor de humedad de suelo, humedad foliar, clorofila en hoja, etc.

POTENCIAL DE APLICACIÓN DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN BOLIVIA

A pesar de existir las condiciones ideales para una aplicación de todos los componentes y tecnologías de agricultura de precisión en Bolivia, existen ciertos problemas que están limitando la adopción.

Uno de los que podría ser considerado de fondo es el grado de educación y/o capacitación de los operadores de maquinaria agrícola. En la mayoría de los casos, son operarios que sólo tienen un nivel de educación primaria y/o técnica media, en donde se requiere de mayor capacitación para lograr que un equipo de agricultura de precisión sea adoptado en forma integral.

Asimismo, otro factor que limita es el poco acceso a capacitación por parte de ellos y las pocas opciones que tienen dentro de la finca en donde están trabajando, las cuales se puede asociar con las limitadas actividades de capacitación en el medio específicamente orientada a operadores de maquinaria agrícola.

Las actividades de capacitación deberían estar enfocadas a operadores de maquinaria, encargados de campo, o incluso a propietarios. Asimismo, deben estar enfocadas no sólo a productores grandes, sino también a productores medianos y pequeños, porque ellos son los que tienen más pérdida económica dada una eventualidad en relación a productores grandes.

El rol de los centros de investigación e instituciones gubernamentales, como el de las universidades y organizaciones de productores, debería estar enfocado a una mayor difusión de actividades de agricultura de precisión, porque es a partir de ahí donde se contribuirá al uso más eficiente de insumos en finca para lograr mejores rendimientos y una mejor productividad, orientada a un mercado cada vez más globalizado.

De la misma forma, se debe hacer uso de todos los medios posibles para lograr una mayor difusión de actividades y/o eventos de agricultura de precisión. En la **Figura 10.3**, se muestra la preferencia de un grupo de técnicos (60), quienes indicaron el medio por el cual recibieron difusión de información relacionada a la agricultura de precisión en Santa Cruz, Bolivia.

En algunos casos será necesario reemplazar la maquinaria convencional y obsoleta por implementos o equipos de precisión que podrán brindarle al productor una mayor productividad y obtener cultivos con una buena distribución en campo y lograr un manejo eficiente de los cultivos.

La adopción lenta de la agricultura de precisión obedece también a que el productor percibe la adopción de tecnología como un gasto en vez de una inversión, aunque como se vio en el Curso de Agricultura de Precisión 2005, esta inversión podría ser cubierta fácilmente con los excedentes de un buen manejo de los cultivos.

Ya que existe un número limitado de productores que ya están trabajando con algunos componentes de agricultura de precisión en sus fincas, sería conveniente dar un mayor seguimiento con fines demostrativos, para lograr una mejor difusión de resultados y de esa forma, incrementar la adopción de la agricultura de precisión en Bolivia.

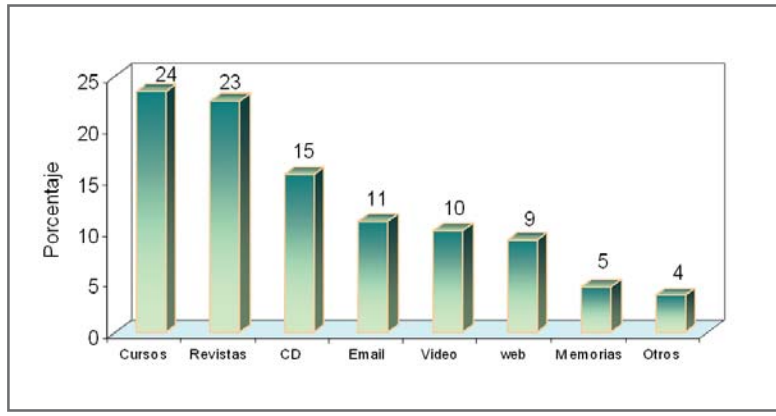


Figura 10.3: Medio por el cual los productores recibieron difusión de información relacionada a la agricultura de precisión en Santa Cruz, Bolivia.

AGRADECIMIENTOS

La recopilación de esta información fue posible gracias a la información proporcionada por diferentes casas comerciales que trabajan con herramientas e implementos de Agricultura de Precisión en Bolivia: BARGO, ISATEL, MERTIND, SACI, PROFEL, entre otros.

Parte de la información utilizada son resultados de la encuesta realizada a los 60 asistentes del 1er. Curso Taller Internacional de Agricultura de Precisión (**Figura 10.4**) realizado en Santa Cruz, Bolivia del 7 al 9 de Septiembre de 2005, organizado por el Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur (PROCISUR), el Centro de Investigación Agrícola Tropical (CIAT), el Ministerio de Asuntos Campesinos y Agropecuarios (MACA) y la Asociación de Productores de Oleaginosas y Trigo (ANAPO).

Figura 10.4: 1er. Curso Taller Internacional de Agricultura de Precisión realizado en Santa Cruz

10.3. AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN BRASIL

Evandro Mantovani
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria (EMBRAPA), Brasilia, Brasil.
evandro.mantovani@embrapa.br

ESTUDIO DE CASO:

El manejo por promedios acaba de ser abolido en el Establecimiento Vargem Grande.

Quién es el productor y su historia

Descendiente de holandeses, Andreas Charles Josef Peeters (**Figura 10.5**) nació en la hacienda de una cooperativa ubicada en Holambra (de Holanda, América y Brasil), localidad que en 1993 fue transformada en municipio al emanciparse de Jaguariúna, en la Gran Campinas. Se inició en la agricultura a los 19 años en un establecimiento a 90 km de su lugar de nacimiento. Su gusto por el algodón es de esa época. Antes de roturar el Cerrado brasileño, la familia decidió crear la Agropecuaria Peeters S/A.

Figura 10.5: Andreas Charles Josef Peeters

Andreas Peeters descubrió Goiás por casualidad. Un día, en sus idas y venidas a Mato Grosso en busca de tierras para expandir los negocios iniciados en la región paulista de Holambra, la camioneta se descompuso, obligando a este descendiente de holandeses a pasar la noche en Río Verde. Le gustó tanto el lugar que dio comienzo a la historia de la Agropecuaria Peeters en Montividio (GO), hoy referencia nacional en siembra directa de algodón y en integración de cultivos a la ganadería.

Características de la propiedad y su explotación

Pasaron casi dos décadas desde el día en que el productor rural Andreas Charles Josef Peeters inició sus actividades en el Cerrado goiano, más precisamente en la ciudad de Montividio, en el sudoeste de Goiás. Allí, en 1985, comenzó una experiencia exitosa que transformaría el establecimiento Vargem Grande en un ejemplo nacional de tecnología agropecuaria.

Andreas cosecha hoy, en Montividio, soja precoz en enero y febrero, luego el maíz de verano y el de invierno. Más adelante, en el establecimiento Vargem Grande, se adopta el sistema cosecha de poroto a fines de mayo. La cosecha del algodón comienza en junio y el producto se comercializa de septiembre a diciembre. "Con la integración a la ganadería, puedo organizar un flujo de caja

de la propiedad que me permite programar las compras de insumos y las inversiones", señala el productor. La propiedad, administrada por el propio Andreas Peeters, es también una referencia en la región en el tema de integración a la ganadería. Trabaja, desde San Pablo, con la raza Canchim – 3/8 Nelore y 5/8 Charolais – muy apropiada para el Cerrado, pues es un ganado precoz y rústico al mismo tiempo.

La gramínea se planta con el maíz en la misma operación, sin que haya influencia negativa en la productividad del maíz ni en la gramínea. El maíz de verano se cosecha en marzo, con pastoreo de abril a octubre, y el de invierno a fines de julio, con pastoreo hasta octubre. El pasto de verano está en rotación, con el destete y la recría ya castrada y algunos animales de descarte.

En octubre los animales están prontos para faenar. El pastoreo Santa Fé de maíz de invierno se usa para que la parición de las vacas madre se produzca durante los meses de julio, agosto y septiembre. Después del pastoreo, el algodón se planta por sistema de siembra directa. "Yo uso la gramínea forrajera, que tiene un sistema radicular fabuloso. Rinde el doble de masa seca subterránea en relación a la aérea. Las raíces llegan a tres metros de profundidad. La raíz del algodón recorre el mismo camino de la gramínea", observa Peeters.

Alta tecnología

Las sembradoras modernas de siembra directa llegaron al establecimiento Vargem Grande en el 2001. Con los nuevos equipos, surgió la necesidad de tractores con potencia superior a los 200 CV. Pero no todo es color de rosa en la agricultura de este productor nacido en Holambra. "Estamos con la productividad de la soja estancada entre 56 a 58 sacos por hectárea, y del maíz en la franja de 130 a 135 sacos por hectárea, en verano, y de 80 a 90 sacos por hectárea en invierno. La solución que encontré para que todo el lote coseche bien ha sido la agricultura de precisión", relata Andreas Peeters.

El primer paso para descubrir las causas de ese límite en el rendimiento fue hacer un relevamiento de la fertilidad del suelo y la utilización de dosis diferenciadas de calcáreo, fósforo y potasio. En las operaciones de siembra y en las aplicaciones de cloruro de potasio al voleo, se utilizaron solamente las dosis de reposición. Este año ya se observó un desarrollo más uniforme de la soja.

También se hicieron análisis de micronutrientes y foliares para evaluar qué fue lo que la planta realmente tomó del suelo, qué precisa y qué tiene de deficiencia. Y durante la cosecha 2003/2004 se hicieron los primeros mapas de rendimiento con el sistema Fieldstar de agricultura de precisión.

Con todos estos mapas - fertilidad, foliar y cosecha - se hará una especie de "tomografía" del suelo para que, en la campaña 2004/2005, se comience a aplicar la dosis variable de calcáreo, fósforo y potasio. Con el fin de ahorrar en abonos y fertilizantes, y al mismo tiempo aumentar la productividad del cultivo, Andreas Peeters decretó el fin del manejo por promedio en el establecimiento Vargem Grande, introduciendo una innovación más en la agropecuaria goiana.

10.4. AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN CHILE

Stanley Best
sbest@inia.cl
Instituto de Investigaciones Agropecuaria (INIA)
Chile

La vitivinicultura y fruticultura son los sectores más dinámicos de la agricultura chilena, la cual si bien tuvo un período difícil en los primeros años de este siglo XXI, en la actualidad está en expansión, lo que se ha reflejado en los últimos años, en un incremento de las plantaciones de viñas tanto en cepas tintas como blancas, como de variedades de frutales entre los que encontramos los paltos, arándanos, entre otros. Sin embargo, los procesos de globalización económica y la incursión de nuevos países productores de vino al mercado internacional, han hecho indispensable el mejoramiento de la productividad y más aún de la calidad de los vinos y frutas que van a los mercados externos. A este hecho, se suma, en lo referente a vinos, el aumento del consumo de mejor calidad de éstos por los países desarrollados, principales importadores de vinos en el mundo, aumentando la demanda por este tipo de vinos. Así, la competencia en los mercados internacionales en esta materia, es cada vez más fuerte.

Bajo condiciones adecuadas, la producción de fruta de calidad, desde un punto de vista técnico, se basa en la obtención de una materia prima de igual condición y de un procesamiento de alto nivel tecnológico. El aumento de la producción de fruta de calidad, puede ser logrado mediante prácticas de riego, fertilidad, poda, y otras herramientas de manejo. Sin embargo, el diagnóstico de las variables que definen el resultado potencial de la producción en huertos frutales y viñedos, en mayor parte, están basados sobre criterios cualitativos, los que poseen un éxito en su aplicación que depende fundamentalmente de la experiencia de los asesores y administradores de cada campo, la cual no siempre es exitosa. Estos esquemas de diagnóstico tienen una aplicación cuya eficiencia es limitada, ya que se ha visto que existe una tendencia hacia la subestimación o sobreestimación de la variación espacial y temporal de las variables antes mencionadas, por los que se obtiene un diagnóstico sólo parcial cuando se intenta generar una visión completa de un viñedo o huerto para fines de manejo del mismo. Así, el rendimiento y calidad final de la fruta producida, debe enmarcarse dentro de un plan de manejo de las variables que los determinan y, aún más importante, que esta información sea oportuna para poder tener ingerencia sobre la producción final.

Por lo tanto, la metodología de trabajo asociada a la agricultura de precisión, planteada e introducida principalmente por el INIA en Chile, permitió generar soluciones a los problemas anteriormente planteados, al tener como uno de sus fundamentos de trabajo la variación espacial y temporal de las áreas productivas para llevar a cabo el manejo del mismo (manejo de sitio específico) acorde al conocimiento integral del predio.

Dentro del esquema de agricultura de precisión desarrollado en Chile, se generaron diversos elementos técnicos exitosos con gran nivel de adopción del mercado que permiten justificar las tecnologías desarrolladas. Así, el resultado principal de la investigación y desarrollo de los programas de agricultura de precisión en Chile, ha sido la introducción de una nueva tecnología al sector vitivinícola y frutícola, la cual se ha basado en el uso de imágenes multiespectrales para identificar y magnificar las diferencias en los sectores productivos y asociar estas diferencias a las causales en terreno. El contar con esta información sectorizada dentro del viñedo o huertos frutícolas, ha permitido facilitar la toma de decisiones para corregir o disminuir la variabilidad, obtener registros temporales y lograr gestionar los sectores productivos de forma integrada en un sistema digital. Las potencialidades de esta metodología se traducen en la posibilidad de gestionar el manejo de los predios por medio de la zonificación natural existente y establecer un

procedimiento ordenado en la cosecha por madurez, aplicación de agroquímicos y decisiones de riegos, entre otras labores culturales, que permitan mantener un equilibrio entre carga frutal/ área foliar, que son fundamentales para la producción y calidad de la fruta, y finalmente, en el caso del vino, su calidad.

Así, producto de los resultados obtenidos, se pudo realizar los ajustes necesarios en las herramientas de agricultura de precisión, que ha permitido llevarla a un plano de uso técnico – económico factible, factor refrendado en creación de empresas de servicios en esta área y con más de un 40% de la superficie plantada de viñas de calidad de Chile (60.000 ha aproximadamente) usando en algún nivel la agricultura de precisión. Sin embargo, debe tenerse en cuenta la necesidad de seguir avanzando en el desarrollo de esta metodología en aspectos más finos, factor que está siendo abordado por los centros de investigación del país, con especial énfasis por el Programa de Agricultura de Precisión del INIA.

Para el caso de frutales, la adopción ha sido más lenta ya que se está en la etapa de generación de resultados técnicos y económicos viables por parte del sector de investigación. Sin embargo, existe un interés cada vez mayor sobre este tema. Uno de los puntos que ha causado alto interés se refiere a que contar con información digitalizada sobre las distintas variables y labores realizadas en toda la temporada de producción, facilita el cumplimiento a las crecientes exigencias internacionales de trazabilidad.

Por último, esta tecnología ayuda a posicionar a las empresas a un nivel de competitividad igual o superior que los países desarrollados, aumentando el horizonte de competitividad de la agricultura chilena.

Por otra parte, los esfuerzos en el desarrollo e implementación de la agricultura de precisión en cultivos tradicionales en Chile han sido marginales debido a la baja rentabilidad de éstos y a la reducida superficie asociada por agricultor que existe en nuestro país, al contrario de lo que ocurre en otros países del Cono Sur. Sin embargo, existen iniciativas de investigación lideradas por el INIA y Universidades Chilenas -especialmente en maíz y arroz, entre otras- pero sin los recursos requeridos para lograr un impacto mayor de éstas. Asimismo, existen esfuerzos importantes de privados (empresas de fertilizantes, maquinaria agrícola) y algunos grandes productores para homologar tecnologías desarrolladas en otros países. Pese a esto, se visualiza un mayor interés por parte del gobierno y productores de apoyar la investigación y desarrollo en estas áreas, en gran parte, por los resultados obtenidos en otros rubros y por los éxitos internacionales.

Finalmente, se puede resumir que la agricultura de precisión en Chile ha sido exitosamente introducida y aplicada comercialmente en cultivos de exportación, principalmente el sector vitivinícola. Sin embargo, se visualiza un incremento de brechas tecnológicas entre el sector productivo empresarial y los agricultores de menores dimensiones, ya que no existe en la actualidad un desarrollo cabal de capacitación e información de estas tecnologías, principalmente, por falta del recurso humano capacitado para llevarla a cabo. Este último punto es de vital importancia para que exista una transferencia vertical de estos conceptos tecnológicos que permitan generar una mayor demanda tecnológica y a la vez, genere una respuesta tecnológica del medio a través de empresas de servicio y de investigación. Bajo nuestra apreciación, creemos fervientemente que la mejor forma de llevar a cabo esta capacitación tiene que tener un componente fuerte en el uso de las tecnologías de la información, debido a la falta de recursos humanos y monetarios necesarios para una difusión masiva y rápida como la que se requiere para lograr avances significativos en el campo.

10.5. AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN PARAGUAY

Pastor Kawamura; Adrián Palacios; José Quintana y **César Ken Hoshiba**
Centro Regional de Investigación Agrícola (CRIA) Capitán Miranda, Itapúa, Paraguay
a_precision@cria.org.py; kawa@itacom.com.py

INTRODUCCIÓN

Una gran parte de la población de Paraguay depende de la agricultura, aunque la mayoría de los productores practican agricultura de subsistencia (CIA, 2005). El sector agropecuario y forestal tiene una gran importancia relativa, ya que aportan el 26% del PBI y constituyen el 90% de las exportaciones (FAO, 2005).

Por otra parte, la tenencia de la tierra no está muy bien distribuida, ya que más del 80% de los productores son minifundistas, con propiedades de menos de 20 ha, y constituyen menos del 7% de toda el área cultivable, mientras que los campos de más de 1.000 ha (1% de los productores) componen el 77% de toda el área cultivable (FAO, 2005).

Dentro de Paraguay existen regiones muy desarrolladas en áreas cercanas a la frontera Este con Brasil y con Argentina (Valle del Alto Paraná), coincidentes con asentamientos de colonias de inmigrantes brasileros, alemanes y japoneses, entre otros.

Principales cultivos de Paraguay

Los principales cultivos en la Campaña 2002/03 fueron los que se muestran en el **Cuadro 10.3** (MAG, 2005).

Al igual que otros países del Cono Sur de América, la soja es el motor de la expansión del sector agropecuario, y la difusión de este cultivo está relacionada al consumo de nutrientes, el que aumentó de 71.052 t en 2000 a 298.557 t en 2004 (**Figura 10.6**). De acuerdo a García (2005), la soja es el principal destino de los fertilizantes que se usan en Paraguay, la que se encuentra alrededor de los dos millones de hectáreas.

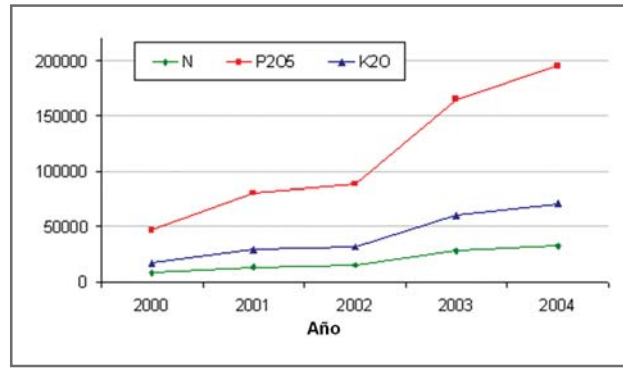


Figura 10.6: Consumo de fertilizantes N P y K en Paraguay (García, 2005)

Cuadro 10.3: Principales cultivos de Paraguay, superficie, producción y rendimiento.

Cultivos Campaña 2002/03	Superficie (ha)	Producción (t)	Rendimiento (kg/ha)
1. Soja	1.870.000	3.583.685	1.916
2. Maiz	440.000	1.120.000	2.545
3. Algodón	320.000	330.000	1.031
4. Mandioca	306.000	5.024.378	16.420
5. Trigo (2)	325.000	682.500	2.100
6. Poroto	73.500	65.195	887
7. Caña de azúcar	69.943	3.637.000	52.000
8. Maní	34.926	33.180	950
9. Girasol	29.700	44.550	1.500
10. Arroz con riego	31.000	125.000	4.032
11. Tabaco	8.268	16.535	2.000
12. Sésamo	40.000	34.000	850
13. Tártago	9.000	10.800	1.200
TOTAL	3.557.337	14.706.823	

DIFUSIÓN DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Con el fin de promover la adopción de Agricultura de Precisión (AP), se realizó un Seminario Internacional sobre Difusión de Experiencias en Agricultura de Precisión en el Cono Sur, en la localidad de Bella Vista-Itapúa, Paraguay, el 15 y 16 de Septiembre de 2004, organizado por el Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur (PROCISUR) y el Centro Regional de Investigación Agrícola (CRIA), dependiente de la Dirección de Investigación Agrícola (DIA) del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) de Paraguay. El CRIA está ubicado estratégicamente en una de las áreas más desarrolladas de la agricultura en Paraguay, en el Distrito de Capitán Miranda – Departamento de Itapúa.

En ocasión del Seminario Internacional, el Vice Ministro de Agricultura anunció un Programa de asistencia técnica integral para pequeños productores, consistente en apoyo a grupos comunitarios para el mejoramiento en el desarrollo económico. Este programa contempla un presupuesto de un millón de dólares y la incorporación de 130 nuevos profesionales equipados con GPS

autónomos, para el relevamiento de superficies cultivadas y rendimientos de algodón y otros cultivos intensivos, en un claro ejemplo de apoyo a los pequeños productores mediante las herramientas de la agricultura de precisión.

Este Seminario fue la ocasión en que se dieron a conocer las herramientas de AP disponibles en el mercado paraguayo; se presentaron las empresas prestadoras de servicios de AP; y se expusieron las primeras experiencias de investigación locales.

La adopción de la AP en el país, al igual que en los países desarrollados, dependerá del éxito económico del receptor de esta tecnología, razón por la cual es necesario trabajos coordinados entre organismos oficiales, para reunir informaciones con la ejecución de experimentos, y empresas privadas que aporten los equipos que hagan la diferencia de eficiencia entre la agricultura tradicional y la agricultura de precisión a nivel de productores.

Herramientas disponibles en el mercado paraguayo

Los productores de punta pueden acceder, en el mercado de Paraguay, a las principales tecnologías de la agricultura de precisión disponibles en el resto del mundo:

- Cosechadoras con monitor de rendimiento y GPS;
- Sembradoras equipadas con sistema electro-hidráulico para dosis variable de dos fertilizantes y densidad de siembra variable;
- Pulverizadoras con banderillero satelital, con Auto-Pilot y con posibilidad de aplicar dosis variable de herbicidas;
- Aviones aplicadores con banderillero satelital;
- Encaladoras/correctoras de pH equipadas con sistema electro-hidráulico de dosis variable;
- Sensores remotos: imágenes satelitales, fotografías aéreas y sensores de N;
- Muestreo de suelos por zonas de manejo; y
- Sistemas de Información Geográfica.

La cantidad de equipos de AP adquiridos y utilizados por los productores se están incrementando con el transcurrir del tiempo, según datos suministrados por empresas proveedoras de estas unidades, tales como Ciabay y LiderMap, pero no se dispone de una estadística exacta hasta finales de 2005.

Primeras experiencias de investigación locales

Kawamura et al. (2005), del CRIA Paraguay, realizaron un estudio de investigación aplicada, en el que presentaron una metodología de trabajo para productores de porte mediano a pequeño, con el objetivo de elaborar mapas de rendimiento mediante los cuales puedan realizar un manejo de sitio-especifico de cultivo y suelos. Fue realizado en una parcela de producción comercial de soja, ubicada en Federico Chávez, distrito de Capitán Miranda, Itapúa, utilizando el sistema de posicionamiento global (GPS), sistemas de información geográfica (SIG) y herramientas para la marcación, cosecha y procesamiento de la soja. Elaboraron dos mapas de rendimiento, con grillas hexagonales de 5000 m^2 y de 2500 m^2. Encontraron una variabilidad muy amplia de

rendimiento de granos, tanto con el muestreo con grillas de un cuarto, como con el de media hectárea. La grilla de un cuarto de hectárea fue la que demostró más detalladamente la variabilidad del rendimiento. Con el muestreo de media hectárea se aumentó la practicidad al disminuir la cantidad de muestras y con el de un cuarto de hectárea, disminuyó la practicidad al aumentarlas.

En la **Figura 10.7** se detalla la parcela del Sr. Julio Izawa que posee un total de 40 hectáreas de las cuales dedica 28 hectáreas a la producción de cereales y oleaginosas, 3,9 hectáreas de reserva boscosa y 8,1 hectáreas son destinadas a prácticas deportivas.

En la **Figura 10.8** pueden observarse las grillas hexagonales, cuya superficie es de 2.500 m^2 con el punto de muestreo en el centro de la misma. Poco después del estadio de madurez fisiológica de la soja se procedió a la marcación del centro de los hexágonos, en el campo, ubicando las coordenadas con un GPS de navegación Garmin III y dejando una estaca en el punto.

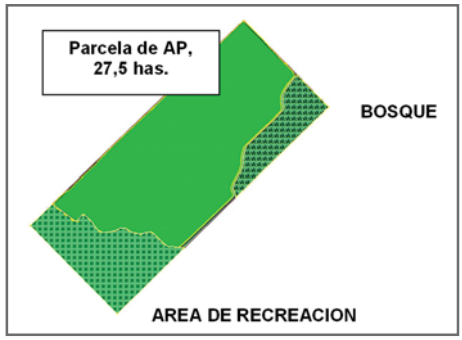


Figura 10.7: Parcela del productor, con superficie total de 40 has.

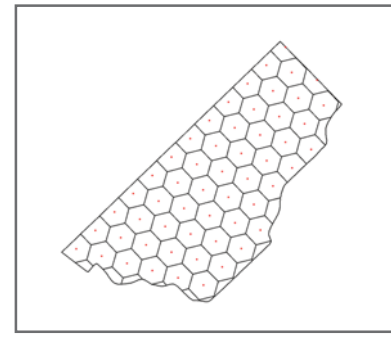


Figura 10.8: Grilla hexagonal de 5000 m2 con sus puntos de muestreo.

Posteriormente, del mismo lugar marcado con la estaca, se procedió a la cosecha de dos hileras de soja con cuatro metros de longitud, dando una superficie de 3,2 metros cuadrados. Se hizo el corte con machete y fue trasladado al lugar de procesamiento donde se determinó el peso de campo, el porcentaje de humedad y el peso de 100 semillas. A partir de estos datos se calculó el rendimiento, en kg/ha, el cual fue ajustado a 14% de humedad. Finalmente, con estos valores por punto de muestreo fue elaborado el mapa de rendimiento (**Figuras 10.9** y **10.10**).

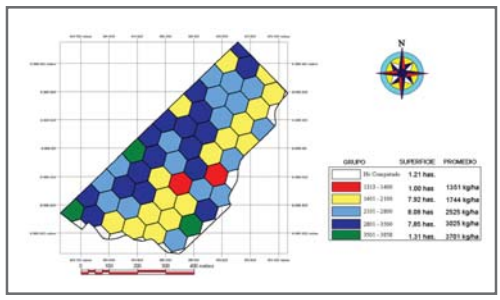


Figura 10.9: Mapa de rendimiento de la grilla de 5000 m2.

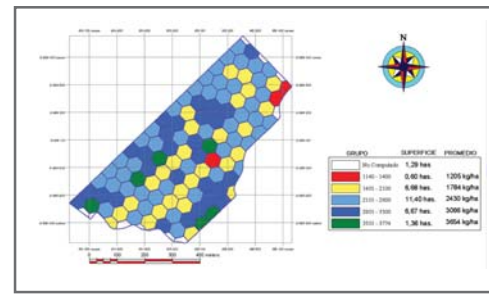


Figura 10.10: Mapa de rendimiento de la grilla de 2500 m2.

Dentro de las 28 hectáreas destinadas a la producción de cereales y oleaginosas, hubo diferencias en el manejo de las subparcelas, ya que según información provista por el agricultor, había áreas de bosque recién desmontado, otra con varios años de cultivo de caña de azúcar, una zona donde hubo acumulación de piedras y otras con varios años de rotaciones con soja, trigo y abonos verdes de invierno.

El manejo heterogéneo de las subparcelas, que supone una diferente extracción de nutrientes, se tradujo en variaciones de las propiedades del suelo, que bajo una situación de estrés hídrico generó mayor diferencia de rendimiento entre las diversas sub-áreas.

El rendimiento de la soja presentó una leve relación con el pH del suelo. Prácticamente, la mitad de las muestras mostraron valores de pH al agua inferior al nivel crítico de 5,6. A medida que el pH tiende a la neutralidad hay una leve tendencia a aumentar el rendimiento de la soja. Esto indica que una de las primeras medidas a ser tomadas, con vista a mejorar el nivel de fertilidad del suelo, es la corrección de la acidez por medio de la adición de calcáreo.

Los valores de materia orgánica, fósforo y potasio se sitúan, en la mayoría de las muestras, por encima de los niveles considerados críticos para cada elemento. Se trata de una parcela, que en los últimos ciclos de cultivo, fue agronómicamente bien manejada con adición suficiente de los principales macronutrientes del suelo. Esto se refleja en la baja relación que se encontró entre la variación de los niveles de la materia orgánica, fósforo y potasio, con el rendimiento.

En futuros trabajos es necesario aclarar cuales son los factores que incidieron en la diferenciación de rendimiento de la soja en diferentes zonas de la misma parcela. También, se debe elaborar un análisis económico tanto de la utilización de los elementos de agricultura de precisión como de los beneficios que se pueden conseguir de su implementación.

Conclusiones del trabajo de investigación

- Quedó demostrada la existencia de una variabilidad muy amplia de rendimiento de granos;
- El muestreo de rendimiento, hecho a través de las grillas de un cuarto y media hectárea, demostró que es posible detectar manualmente la variabilidad de rendimiento de granos existente dentro de la parcela. Con muestreo de media hectárea se aumenta la practicidad al disminuir la cantidad de muestras; y
- La grilla hecha en base a una superficie de un cuarto de hectárea fue la que demostró más detalladamente la variabilidad del rendimiento, pero disminuye la practicidad al aumentar la cantidad de muestras.

Empresas de servicios de agricultura de precisión

Por último, se debe destacar que además del CRIA, en Paraguay existen varias empresas de servicios agropecuarios (consultores agronómicos), y otras más en formación, que proveen asesoramiento técnico en materia de agricultura de precisión. Muchas de estas empresas son también representantes locales (concesionarios) de empresas de maquinaria agrícola o de electrónica, que proveen el servicio técnico necesario para el funcionamiento. Por ejemplo, la **Figura 10.11** muestra un mapa de diferencias de pH del suelo, con la prescripción sitio-específica de calcáreo dolomítico para corregir suelos ácidos, un problema común en los suelos de Paraguay.

La **Figura 10.12** muestra el equipo de dosis variable. Estos servicios son provistos por una empresa local, usando equipos importados de Brasil, Argentina y EE.UU.

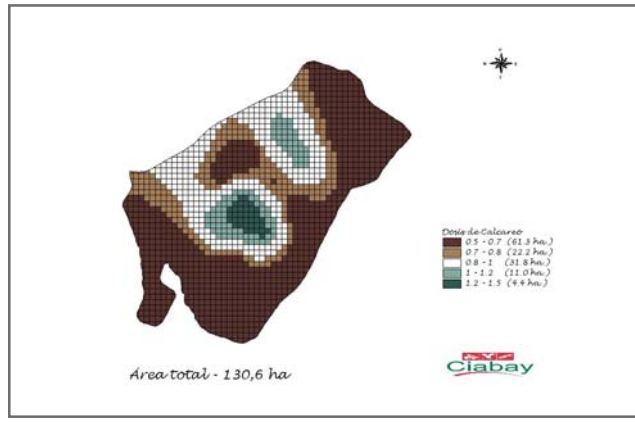


Figura 10.11: Prescripción sitio-específica de calcáreo dolomítico para corregir suelos ácidos

Figura 10.12: Aplicación de dosis variable de calcáreo dolomítico

REFERENCIAS

CIA. 2005 The World Fact Book -- Paraguay. http://www.cia.gov/cia/publications/factbook/geos/pa.html

FAO. 2005. Country Pasture/Forage Resource Profiles: Paraguay. http://www.fao.org/ag/agp/agpc/doc/counprof/paraguay/paraguay.htm

García, F. 2005. Nutrient balance in Paraguay agriculture. http://www.ppi-ppic.org/ppiweb/ltams.nsf

Kawamura, P.; Palacios, A.; Quintana, J. y Ken-Hoshiba, C. 2005. Metodología para la elaboración de mapas de rendimiento para productores mecanizados de porte mediano y pequeño dentro de los conceptos de agricultura de precisión. Centro Regional de Investigación Agrícola (CRIA). Ruta 6 Km 16, Capitán Miranda, Itapúa, Paraguay. kawa@itacom.com.py, criadirecc@cria.org.py

MAG. 2005. Estadísticas. http://www.mag.gov.py/

Revista El Productor. 2004.a Agricultura de precisión: Una tecnología de avanzada para la agricultura moderna. http://www.revistaelproductor.com/Octubre2004/Pagina14.html (Acceso Noviembre 2004)

Revista El Productor. 2004.b Agro Guaraní: Una experiencia en agricultura de precisión http://www.revistaelproductor.com/Noviembre2004/Pagina46.html (Acceso Noviembre 2004)

10.6. AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN URUGUAY

Alvaro Roel (1) y **Hugo Firpo** (2)
1 Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuaria (INIA), Uruguay
aroel@tyt.inia.org.uy
2 Consultor Privado

El objetivo de este trabajo es presentar los principales avances de dos diferentes proyectos realizados en el sector arrocero uruguayo, uno de ellos enfocado desde la investigación y otro desde la producción. Consideramos que ha sido extremadamente beneficiosa la interacción entre ambas líneas de trabajo. Es de destacar que el hecho de haber podido realizar en forma paralela estos dos proyectos permitió, por un lado, ver qué aspectos de los que se están trabajando en la investigación pueden ser fácilmente aplicables en la producción y por otro lado, retroalimentar la investigación con problemas detectados a nivel de la producción.

El Programa Arroz de INIA Uruguay incorporó Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), Sistemas de Información Geográficos (SIG) y monitores de rendimiento para investigar la variabilidad de rendimiento dentro de las chacras de arroz. Estas tecnologías abren nuevas posibilidades para la investigación que permitirán desarrollar capacidades tecnológicas en el país tendientes a consolidar una agricultura sustentable. El proyecto de Agricultura de Precisión de INIA se alinea con las crecientes exigencias de los mercados por obtener productos de alta calidad, producidos en forma amigable con el ambiente, trazables e inocuos.

En forma paralela, se comenzó a trabajar a nivel comercial en un proyecto financiado por el Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca del Uruguay que tenía por objetivo el mapeo y monitoreo con GPS de los recursos naturales y otros factores de producción, para la toma de decisiones y la gestión de la empresa arrocera durante tres zafras del cultivo. A través de este proyecto se monitorearon 785 hectáreas en 125 puntos de muestreos en la primera zafra, 715 hectáreas en 98 puntos de muestreos en la segunda zafra y 519 hectáreas en 101 puntos de muestreo en la última zafra.

El proyecto del INIA tiene como objetivo general la cuantificación de la variabilidad espacial del rendimiento en chacras y la determinación de los factores que la afectan. El proyecto en sí cumple una serie de objetivos a diferentes niveles. En un primer nivel, el objetivo es cuantificar la variabilidad espacial del rendimiento en las chacras de arroz en cada zafra en particular, dentro de dos intensidades de producción de un sistema que se lleva adelante en una Unidad Experimental del INIA en El Paso de La Laguna, Treinta y Tres conocido como la Unidad de Producción Arroz Ganadería (UPAG) y determinar los factores que la afectan. En un segundo nivel, el objetivo es cuantificar en forma espacial la evolución en el tiempo de las variables del suelo en las dos diferentes intensidades de uso del suelo planteadas dentro de la UPAG. En un tercer nivel, el objetivo es ir generando la información necesaria con el fin de evaluar el posible manejo sitio-específico de las variables de producción dentro de las chacras de la UPAG.

A modo de ejemplo de un esquema de trabajo a seguir se presentan los datos recabados en la zafra 2003-2004 en dos de las chacras estudiadas. Este esquema se viene continuando año a año en busca de poder implementar la agricultura de precisión en este sistema de producción. En esta zafra en particular se trabajo en dos potreros de la UPAG (**Figura 10.13**).

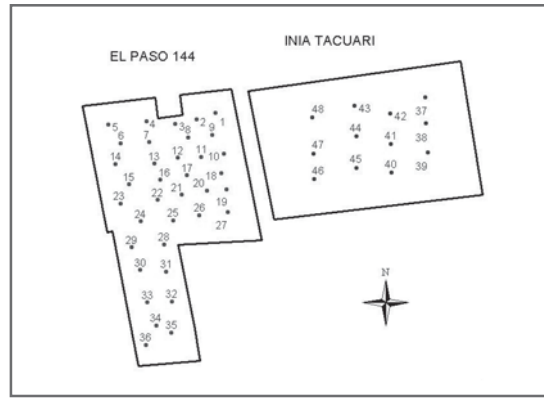


Figura 10.13: Puntos de muestreo en ambas chacras. Área aproximada: 12 ha.

En ambas chacras se midieron, en cada uno de los puntos de muestreos que fueron georeferenciados con un GPS, una serie de variables del suelo y cultivo que se detallan en el **Cuadro 10.4.** En este Cuadro se presentan los valores promedios, máximos, mínimos y el coeficiente de variación registrado para cada variable. Básicamente se registraron parámetros en ambos potreros:

- Del suelo previo a la siembra: textura, niveles de N, P y K y pH, medidas de niveles de esclerocios de Sclerotium y Rhizoctonia en el suelo;
- A la emergencia: stand de plantas emergidas, control de capin luego de aplicado los herbicidas y a la cosecha;
- Al primordio: niveles de N, P, K y materia seca; y
- A la cosecha: niveles de N, P K y materia seca, índice de grado de severidad de ataque de mancha agregada y podredumbre del tallo y componentes de rendimiento.

En la chacra sembrada con la variedad El Paso 144 (12 hectáreas) se decidió implementar un muestreo intenso de las diferentes variables medidas, se tomaron un total de 36 muestras/ variables lo que determina una intensidad de muestreo de 3 puntos de muestreo por hectárea. Evidentemente que ésta es una intensidad de muestreo imposible de pensar realizar a escala comercial; pero a los efectos de este proyecto la intención es poder conocer de forma detallada la variabilidad espacial presente en estas chacras.

La información que se presenta en el **Cuadro 10.4** ilustra la dimensión de la variabilidad que puede existir dentro de un sistema de producción. En este Cuadro podemos apreciar que la variabilidad espacial de los posibles factores abióticos y bióticos afectando rendimiento se comportan de forma muy diferente. Tenemos por un lado, dentro de los factores abióticos, variables vinculadas a la química del suelo que presentan una considerable variabilidad, como es el caso de los niveles de fósforo y otros mucho menos variables, como el pH. Por otro lado, en general, los factores vinculados a la textura del suelo son relativamente menos variables que los factores relacionadas con los aspectos químicos. A su vez, se puede observar que en general los factores bióticos, como son la presencia de malezas y enfermedades, son mucho más variables dentro de esta chacra.

Los datos presentados en este Cuadro sólo nos permiten tener conocimiento de la variabilidad espacial en forma poblacional de cada factor sin tener una idea de cómo está estructurada esta

Cuadro 10.4: Chacra El Paso 144.

Variable	N	Media	Máximo	Mínimo	C.V.
pH 0 - 10 cm	36	5.27	5.81	5.10	2.63
pH 10 - 20 cm	36	5.60	6.34	5.05	4.55
C. Org (%) 0 -10 cm	36	1.66	2.42	1.17	15.5
C. Org (%) 10 -20 cm	36	1.20	1.62	0.90	14.9
P Bray (ppm) 0 -10 cm	36	4.67	8.98	1.85	32.7
P Bray (ppm) 10 -20 cm	36	2.19	4.07	0.98	36.6
P Cítrico (ppm) 0 -10 cm	36	8.55	12.69	4.10	23.3
P Cítrico (ppm) 10 -20 cm	36	5.02	8.59	2.43	35.7
% Arena 0 - 10 cm	36	26.26	48.37	18.97	26.2
% Arena 10 - 20 cm	36	24.82	49.70	12.72	32.7
% Limo 0 - 10 cm	36	44.33	50.47	31.89	8.4
% Limo 10 - 20 cm	36	45.43	52.42	32.73	10.1
% Arcilla 0 - 10 cm	36	29.37	38.40	19.72	14.4
% Arcilla 10 - 20 cm	36	29.73	37.75	17.56	14.6
K (mEg/100g) 0 -10 cm	36	0.24	0.33	0.13	19.7
K (mEg/100g) 10 -20 cm	36	0.17	0.28	0.09	18.9
Plantas/m^2 11 Nov 2003	36	232.19	364	91	28.4
Control de Capin 23 Dic 2003	36	4.18	5	2.82	15.8
Control de Capin 24 Mar 2003	36	4.47	5	2.47	14.4
Materia Seca Primordio (kg/ha)	36	2427.25	3506.25	1393.75	23.4
% P Primordio	36	0.23	0.17	0.15	11.0
% N Primordio	36	1.73	2.29	1.26	13.9
% K Primordio	36	1.61	2.32	1.24	15.9
Kg P/ha Primordio	36	5.56	9.33	2.89	20.9
Kg N/ha Primordio	36	41.27	62.31	29.10	19.7
Kg K/ha Primordio	36	39.99	81.34	19.01	36.3
Materia seca total a cosecha (Kg/ha)	36	26583.40	37186.67	16468.89	18.7
Materia seca Panojas (Kg/ha)	36	11998.09	19213.33	6673.33	21.4
Materia seca tallo y hojas (Kg/ha)	36	14585.31	23531.11	8153.33	25.8
% P grano	36	0.22	0.28	0.19	8.4
% N grano	36	1.11	1.29	0.98	7.7
% K grano	36	0.33	0.53	0.26	15.6
Kg P/ha en grano	36	25.91	40.27	15.09	21.3
Kg N/ha en grano	36	133.43	207.38	84.03	20.2
Kg K/ha en grano	36	39.88	59.17	20.51	23.4
% P en Tallo y Hojas (cosecha)	36	0.15	0.22	0.10	18.4
% N en Tallo y Hojas (cosecha)	36	0.80	1.35	0.66	15.7
% K en Tallo y Hojas (cosecha)	36	0.90	1.16	0.63	16.5
Kg P en Tallo y Hojas (cosecha)	36	21.96	50.15	10.11	42.7
Kg N en Tallo y Hojas (cosecha)	36	119.55	310.62	55.73	40.7
Kg K en Tallo y Hojas (cosecha)	36	130.00	215.25	75.38	26.4
Kg P/ha Total	36	47.87	82.14	28.17	25.0
Kg N/ha Total	36	252.98	394.65	153.90	22.7
Kg K/ha Total	36	169.88	251.62	106.34	22.9
N. Esclerocios de Sclerotium oryzae / gr. Suelo	36	6.90	12.40	0.56	36.5
IGS Podredumbre de tallo Pre Fungicida	36	1.60	6.25	0.00	109.8
N. Esclerocios de Rhizonctonia o.s. / gr. Suelo	36	0.19	0.38	0.02	48.1
IGS Mancha de vainas Pre Fungicida	36	0.07	0.50	0.00	145.9
Lectura Final OGS Mancha de vainas sin Fung.	36	32.70	70.00	5.70	52.6
Panojas / m^2	36	526.96	813.00	221.00	15.5
Granos llenos / Panoja	36	91.69	126.6	69.7	12.8
% Esterilidad	36	22.11	33.77	11.58	25.3
Peso mil granos (gr)	36	25.71	27.04	23.59	3.5
Rendimiento (Kg/ha)	36	8660.51	11732.73	5869.38	15.3

variabilidad. El hecho de haber recabado la posición dentro de la chacra en la que cada una de estas variables fueron medidas nos permite, como ya fue presentado en el Capítulo 8 de este libro, la construcción de los variogramas de cada uno de estos factores. Esto es de extrema importancia, ya que la construcción de los variogramas de cada una de las variables nos permitiría estimar para cada uno de estos factores la distancia y por ende, el número de muestras que sería necesario extraer para representar con cierta certidumbre la variabilidad espacial dentro de esta chacra. Esto es uno de los aspectos claves y prioritarios a llevar a cabo en cualquier esquema de agricultura de precisión que se pretenda en última instancia llegar a un manejo sitio específico del campo.

La alta densidad de muestreo elegida en el Potrero 3 nos permitirá realizar estudios de cómo puede variar la representación de la variabilidad espacial según la intensidad del muestro para cada una de las variables medidas. A modo de ejemplo, en la **Figura 10.14** se presenta el variograma del contenido de Carbono Orgánico en esta chacra. Como se puede observar, este factor presenta un comportamiento espacial bien estructurado, lo que determinaría que en caso de necesitar caracterizar su variabilidad sería suficiente con extraer muestras separadas por una distancia aproximada a los 150 m.

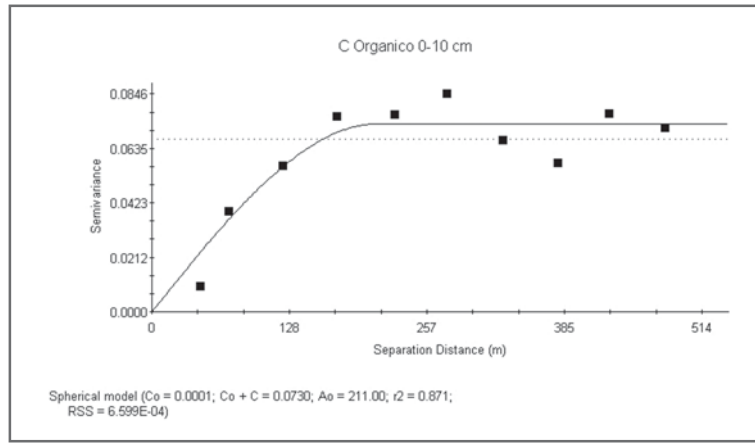


Figura 10.14: Variograma del Carbono Orgánico.

Por último, en la **Figura 10.15** se presenta la variabilidad espacial del rendimiento observada en una de las chacras. Como se puede apreciar, existe una diferencia de rendimiento muy marcada entre diferentes zonas de la chacra, habiendo lugares con niveles productivos altos (11.000 kg/ha) y otros con productividades mucho menores (5.000 kg/ha). El desafío de este proyecto está en poder entender las razones de esta variabilidad, así como también proponer las medidas de manejo que permitan uniformizar el rendimiento de esta chacra. Con el transcurso del tiempo se podrá ir evaluando la estabilidad de estos patrones de rendimiento (variabilidad espacial) en el tiempo (variabilidad temporal) dentro de cada una de las chacras. Esto es unos de los pasos necesarios y prioritarios para realmente comprender si todas las zafras son afectadas por los mismos factores o si éstos son múltiples y diferentes entre zafras. Consideramos que es siempre extremadamente importante llevar adelante primero un estudio de las características espacio-temporales del rendimiento de una chacra antes de comenzar a pensar en cualquier manejo sitio-específico de la misma (Roel y Plant 2004a).

Paralelamente con el proyecto de investigación, se lleva adelante el proyecto comercial en varias empresas arroceras, en donde se siguió el siguiente procedimiento en una proporción mayoritaria de sus chacras.

Se comenzó con la captura de datos para ser incorporados al sistema de información geográfica. Con este sistema se logró disponer de datos de las empresas arroceras digitalizados, con lo que se obtuvo un plano base con diferenciación de caminos, canales y sistemas de riego, cursos de agua, áreas improductivas y áreas de cultivo.

Una vez logrado esto, que como se explicó en los objetivos, consiste en conocer las coordenadas geográficas del predio o características del mismo, la utilización del GPS permitió dirigirse a los puntos de interés dentro de cada empresa (**Figura 10.16**). Éstos eran definidos como puntos de monitoreo, en ellos se relevaba toda la información relacionada con el suelo y manejo del cultivo.

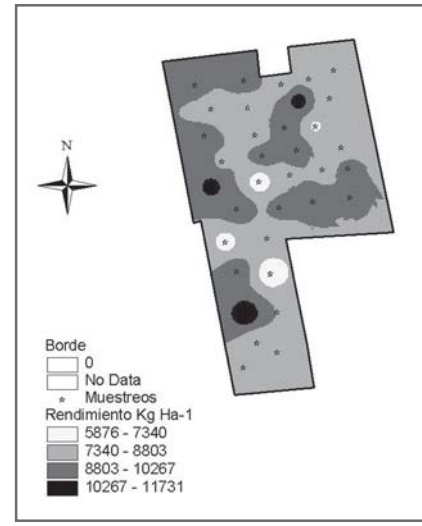


Figura 10.15: Mapa de rendimiento. Variedad El Paso 144.

Por ejemplo, para esta parcela se analizaron en cada punto acidez (pH), materia orgánica (contenido orgánico en %), Fósforo (ppm), Potasio (mEq.) y textura (% arena, %limo, %arcilla) y se construyeron sus respectivos mapas (**Figura 10.17**).

Durante el desarrollo del cultivo se vuelve a ir a estos mismos puntos (guiados por el GPS) y se realiza el seguimiento del cultivo, registrándose las características de nuestro interés en dichos puntos. Dependiendo de la etapa de crecimiento en que se encuentre el arroz se relevan diferentes

Figura 10.16: Puntos de monitoreo.

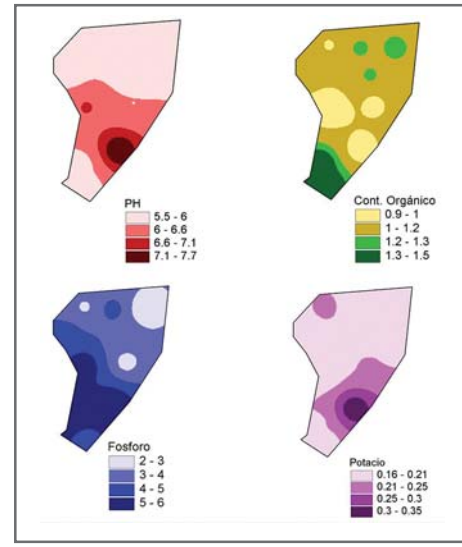


Figura 10.17: Variación de pH, C orgánico, fósforo y potasio.

características. Esto permite, por un lado, recabar datos del cultivo en cada punto y por otro, proyectar espacialmente para toda la parcela el estado general del mismo, o la distribución espacial del rendimiento, de la emergencia, del riego o cualquier otra característica que se haya monitoreado (**Figura 10.18**).

En este caso que usamos como ejemplo, se puede apreciar que el control de malezas estaría explicando parte del rendimiento final de la parcela, ya que los puntos de mayor rendimiento (zonas verdes más oscuras), están relacionadas con los puntos (zonas celeste claro) donde el control de malezas fue más eficiente.

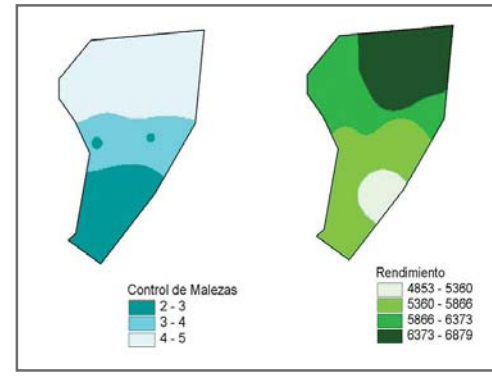


Figura 10.18: Variabilidad espacial del control de las malezas y el rendimiento.

Por último, toda la información recabada fue analizada utilizando el procedimiento CART (Classification and regression tree, Breiman et al 1984) seguido por Roel y Plant (2004b) para detectar factores asociados a la variabilidad de rendimiento. La metodología CART consiste en generar árboles de clasificación y regresión entre las variables asociadas con el rendimiento. Esta metodología permite agrupar, de acuerdo a las variables estudiadas, conjuntos de localidades dentro de la chacra que tengan diferencias importantes de rendimiento (**Figura 10.19**). Tiene la ventaja adicional de ser un método no-paramétrico, por lo cual es mucho menos estricto en los requerimientos de supuestos.

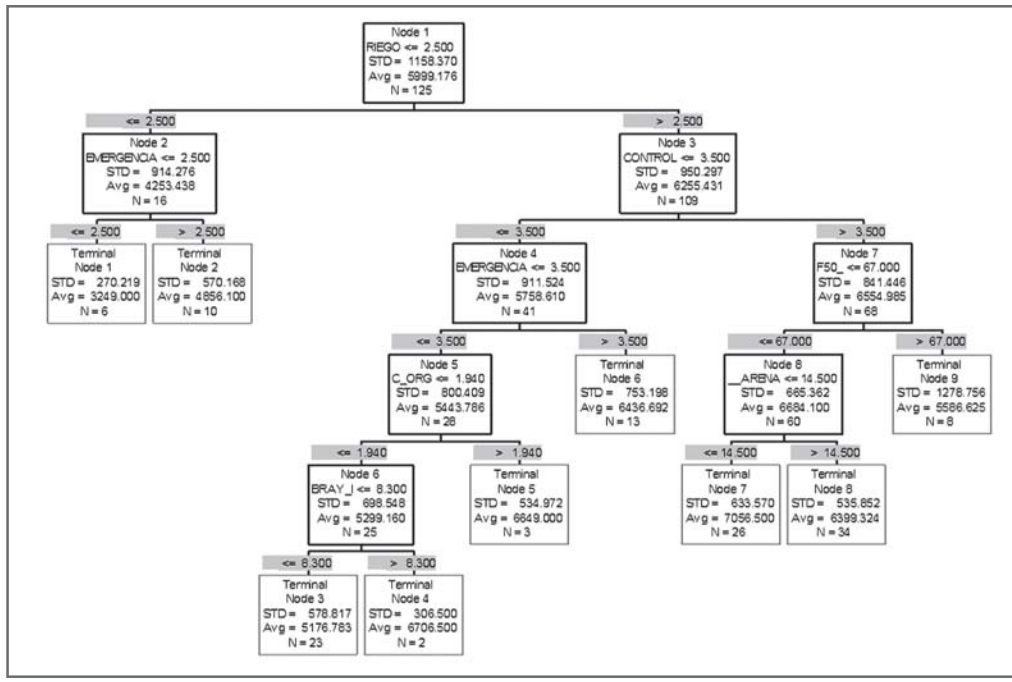


Figura 10.19: Árbol de clasificación y regresión (CART)

CART genera un esquema en forma de árbol donde ordena los datos por los factores que influyeron en mayor medida en el logro de mayor rendimiento. Agrupa los puntos con peor resultado en base a un factor determinante, que para este ejemplo que estamos utilizando, el primer grupo lo diferencia la "calidad del riego", donde separa los puntos en la chacra con riego con un coeficiente menor a 2,5 dentro. La variación de la variable calidad de riego oscila entre 1 (riego deficiente) y 5 (sin problemas de riego).

Como puede apreciarse en la **Figura 10.19**, este procedimiento permitió establecer que la variable "calidad del riego" en su valor 2,5 es capaz de generar dos grupos de localidades con rendimientos muy diferentes, aquellos que presentaron un valor menor 2,5 (peor calidad del riego) tuvieron un rendimiento promedio de 4253 kg/ha mientras que las localidades que obtuvieron un valor superior a 2,5 tuvieron un rendimiento de 6255 kg/ha. Si seguimos hacia abajo analizando el árbol generado podemos ver que en aquellas localidades con problemas de riego la variable emergencia fue la elegida para separar diferentes grupos de rendimientos, mientras que en las localidades sin problemas de riego, la variable control (control de malezas) fue la seleccionada para separar los grupos de localidades con rendimientos diferentes. Por lo tanto, esta metodología nos va indicando la importancia de las diferentes variables de acuerdo al nivel de rendimiento establecido, lo cual es sumamente importante a la hora de definir una estrategia de manejo sitio-específico.

Consideramos que los avances en ambos proyectos cubren las expectativas primarias del uso inmediato de esta tecnología y vemos positivamente que se lograran aplicaciones no valoradas inicialmente. Se logró simplificar enormemente los pasos para poner estas tecnologías en práctica a nivel comercial y se lograron experiencias en el tema, que hoy permite plantearse una gama de posibilidades y alternativas que originalmente no serían aplicables de no haberse recorrido las etapas de este proyecto.

REFERENCIAS

Breiman, L.; Friedman, J.H.; Olshen, R.A. y Stone, C.J. 1984. Classification and regression trees. Chapman and Hall, New York.

Roel, A. y Plant, R.E. 2004.a Spatiotemporal Analysis of Rice Yield Variability in Two California Fields. Agronomy Journal 96 (1): 77-90.

Roel, A. y Plant, R.E. 2004.b II. Factors Underlying Yield Variability in Two California Rice Fields. Agronomy Journal 96: 1481-1494.

Diseño y diagramación:
Mercosoft Consultores
www.mercosoft.com

Noviembre, 2006

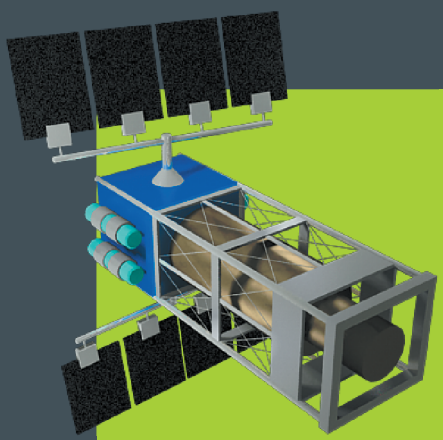
EDITORES:

Rodolfo Bongiovanni, Ph.D.
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)
Estación Experimental Agropecuaria Manfredi, Argentina

Evandro Chartuni Mantovani, Ph.D.
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria (EMBRAPA)
Brasilia, Brasil

Stanley Best, Ph.D.
Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA)
Centro Regional de Investigación Quilamapu, Chile

Álvaro Roel, Ph.D.
Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA)
Estación Experimental Treinta y Tres, Uruguay



PROCISUR